MANUEL

DE

PHYSIQUE

RÉDIGÉ CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES DU
BACCALAURÉAT ET DE L'INSCRIPTION
DANS LA FACULTÉ DES ARTS DE
L'UNIVERSITÉ LAVAL

PAR

L. MINIER

ANCIEN PROFESSEUR DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE AU COURS
LEBLOND, BRUMATH ET BONNIN ET LAMBERT DE ROODE

Avec 113 figures intercalées dans le texte

MONTRÉAL
CADIEUX & DÉROME, LIBRAIRES-ÉDITEURS
1603, rue Notre-Dame

1900

MANUEL

DE

PHYSIQUE

37541

MANUEL

DE

PHYSIQUE

RÉDIGÉ CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES DU
BACCALAURÉAT ET DE L'INSCRIPTION
DANS LA FACULTÉ DES ARTS DE
L'UNIVERSITÉ LAVAL

PAR

L. MINIER

ANCIEN PROFESSEUR DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE AU COURS
LEBLOND DE BRUMATH ET BONNIN ET LAMBERT DE ROODE

Avec 113 figures intercalées dans le texte

MONTRÉAL
CADIEUX & DEROME, LIBRAIRES-ÉDITEURS
1603, rue Notre-Dame

1900

Enregistré, conformément à l'acte du parlement du Canada, en l'année mil neuf cent, par CADIEUX & DEROME, au bureau du ministre de l'agriculture, à Ottawa.

PRÉFACE DES ÉDITEURS.

Voici un livre qui vient en son temps et on ne saurait trop féliciter M. Minier de le faire paraître. Quiconque a essayé de donner aux jeunes gens un premier enseignement scientifique solide, reconnaît la nécessité d'un texte clair, court, substantiel, autour duquel se groupent les explications orales du professeur. Si, en outre, les élèves se sentent obligés non seulement de recourir à telle ou telle source, mais de répondre à tel ou tel ordre de questions dans un examen, ils aiment à se prémunir contre les surprises de l'émotion, à prévoir la réponse exacte, à mettre ainsi de leur côté le plus de chances possible.

Nous ne doutons pas que les professeurs de nos divers collèges n'aient trouvé le moyen de répondre aux besoins et aux désirs des jeunes gens en leur livrant des résumés écrits au miméographe ou autrement. Mais un texte imprimé est toujours plus agréable. Celui qui est offert aujourd'hui sera bientôt connu et

apprécié de tous. Il suit le programme de physique imposé pour l'examen du baccalauréat à l'Université Laval ; il répond nettement et brièvement à chaque question. Les amateurs de la science pourront désirer çà et là un mot de plus, mais il faut se rappeler que le compendium destiné à aider la mémoire n'exclut ni les explications orales du professeur ni la lecture d'un auteur plus étendu.

Le niveau des études d'un pays dépend non des gros volumes adoptés dans les classes, mais des connaissances réelles et précises qui restent dans les têtes. M. Minier excelle à communiquer ces connaissances précises. A peine depuis deux ans à Montréal, il s'est fait apprécier par sa méthode claire et graduée d'enseigner la physique, la chimie, la pharmacie, etc. Ses élèves sont unanimes à faire son éloge. Ce petit traité et d'autres qu'il se propose de publier lui attireront bientôt la reconnaissance du plus grand nombre.

Nous n'en disons pas davantage, car, tout en restant dans la vérité, nous semblerions faire un panégyrique. Nous attendons avec confiance le jugement des élèves et des maîtres, et nous espérons qu'en adoptant ce livre ils en constateront vite le mérite et l'opportunité.

Toutefois, comme la perfection n'est pas de ce monde, nous regarderions comme des amis ceux qui voudraient bien nous signaler les défauts de notre œuvre,

et dans une édition suivante on s'efforcerait de mettre à profit leurs avis bienveillants. Nous voulons faire pour la physique un excellent aide-mémoire, qui soit pour le Canada ce que sont en France les mémento du baccalauréat de Hachette et de Nouy.

CADIEUX & DEROME.

MANUEL

DE

PHYSIQUE

CHAPITRE I.

PRÉLIMINAIRES.

1. Objet de la physique.—Matière.— Corps.—Atomes —Molécules.—(Définitions).

(*a*) *Objet de la physique.*—La physique est la science qui a pour objet l'étude des phénomènes que présentent les corps en tant que ceux-ci n'éprouvent pas de changement dans leur composition, c'est-à-dire l'étude des *phénomènes passagers.*

On appelle *phénomène,* dans le langage scientifique, une modification quelconque qui survient dans la nature ou l'état d'un corps.

(*b*) *Matière.*—On comprend sous le nom de matière tout ce qui peut affecter nos sens.

(*c*) *Corps.*—On appelle corps toute quantité de ma-

tière limitée ; tout corps occupe dans l'espace indéfini une certaine étendue qui constitue son *volume*. Ex. : l'air, l'eau, la terre sont des corps.

(*d*) *Atomes.*—Les corps sont formés par une infinité de points matériels infiniment petits, impalpables, inaccessibles à nos sens, ne pouvant être divisés physiquement et auxquels on a donné le nom *d'atomes*, de *atomos*, insécable.

(*e*) *Molécules.*—Les groupements d'atomes forment les *molécules*, qui, elles, en s'unissant, constituent les corps.

La molécule est donc la plus petite parcelle d'une substance chimiquement définie qui puisse exister à l'état individuel et isolé.

(*f*) *Masse.*—On entend, par masse d'un corps, la quantité d'éléments qu'il contient.

2. Etat des corps. (Ce qui les caractérise.)

Les corps se présentent sous trois états : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.

(*a*) *Etat solide.*—Les corps à l'état solide sont ceux dont on ne peut séparer les molécules sans un certain effort. Ils ne varient dans leur volume et leur forme que sous l'influence d'une cause étrangère.

(*b*) *Etat liquide.*—Les corps à l'état liquide sont ceux dont les molécules, entièrement mobiles, glissent facilement les unes sur les autres ; ils n'ont pas de forme particulière et adoptent facilement celle des vases qui les contiennent.

(*c*) *Etat gazeux.*—Les corps à l'état gazeux sont ceux dont la mobilité de leurs molécules est beaucoup plus grande que celle des liquides et tendent toujours à s'écarter.

3. Causes des phénomènes physiques, théorie dynamique. (Exposé succinct).

(*a*) *Causes des phénomènes physiques.*—Comme cause de

ces phénomènes, on admet des *agents physiques* ou *forces naturelles* qui sont :

L'*attraction, la chaleur, la lumière, le magnétisme* et *l'électricité.* A ces différentes forces naturelles on pourrait ajouter celle de *l'attraction* qui fait que tous les corps tendent mutuellement l'un vers l'autre, et adhèrent étroitement jusqu'à ce qu'une autre force vienne les séparer.

Il existe *l'attraction* ou *gravitation universelle* quand on la considère relativement à l'action réciproque des corps célestes ;

L'*attraction terrestre* ou *pesanteur,* quand elle s'applique à l'action de la terre sur les corps qu'elle sollicite à tomber ;

L'*attraction moléculaire,* quand elle tend à rapprocher les molécules des corps. L'attraction moléculaire prend le nom de *cohésion,* quand elle s'exerce sur des molécules homogènes, c'est-à-dire de même nature, et celui d'*affinité* quand elle tend à unir des molécules de nature différente.

(*b*) *Théorie dynamique.*—Autrefois les anciens, pour expliquer les phénomènes naturels, leur attribuaient une cause surnaturelle et ils inventaient une divinité spécialement chargée de la produire. Ainsi fut créé le dieu du feu, du soleil, de la lune, etc., etc. Après quoi vinrent les alchimistes avec leurs formules cabalistiques. Alors on n'attribuait plus la cause des différents phénomènes à des personnes, mais à des entités particulières, qu'on supposait dénuées de poids et qu'on appelait fluides impondérables ; il y avait les *fluides lumineux, calorifiques, les électricités résineuse et vitrée* ou *fluides électriques positif et négatif, les deux magnétismes* ou *fluide magnétique boréal et austral.*

Aujourd'hui le développement des sciences expérimentales a démontré l'inutilité de tous ces fluides hypothétiques et l'on admet l'existence de mouvements molé-

culaires qui nous échappent individuellement, mais qui affectent nos sens, mouvements qui nous sont transmis par l'*éther* (milieu hypothétique qui remplit l'espace et pénètre intimement tous les corps) et qui nous font éprouver, suivant leur amplitude ou leur vitesse, la sensation de *chaleur* ou la sensation de *lumière*.

Dans cette théorie, non seulement les molécules des corps transmettent le mouvement aux molécules de l'éther, mais celles-ci les communiquent aux premières, en sorte que les molécules des corps et de l'éther sont successivement des sources et des récipients de mouvement. Tous les phénomènes physiques rapportés ainsi à une cause mécanique unique ne sont que des transformations de mouvements.

CHAPITRE DEUXIEME.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

On entend, par propriétés des corps, les qualités, les caractères qui les distinguent, qui les déterminent. Les unes sont *particulières* c'est-à-dire spéciales à tel ou tel corps. Ex. : la *dureté*, la *transparence*, l'*opacité*, la *ténacité*, la *couleur*, la *flexibilité*, la *légèreté*, la *ductilité*, la *malléabilité*, etc., etc.

Les autres sont *générales* c'est-à-dire communes à tous les corps, Ex. : l'*étendue*, l'*impénétrabilité*, la *divisibilité*, la *dilatabilité*, l'*élasticité*, la *porosité*, la *mobilité* et l'*inertie*.

(*a*) *Etendue*. — L'étendue est la propriété dont jouit tout corps d'occuper une portion limitée de l'espace.

Les corps dans l'espace occupent trois dimensions, qui sont la *longueur*, la *largeur* et la *profondeur* ou *épaisseur*.

Les limites qui terminent un corps et qui n'ont pas d'épaisseur, sont des *surfaces*.

Un corps ayant plusieurs faces, chacune a, dans le lieu où elle se joint à une autre, ses limites, qui n'ont ni épaisseur, ni largeur et qu'on nomme *lignes*.

Les endroits où les lignes se rencontrent, leurs limites ou leurs extrémités, qui n'ont ni épaisseur, ni largeur, ni longueur, s'appellent *points*.

La propriété de l'étendue est évidente pour les solides et les liquides. Pour les gaz on la constate en plongeant un verre renversé dans l'eau, le liquide n'y pénètre pas à cause de l'air qui y est contenu.

(*b*) *Impénétrabilité.* — L'impénétrabilité est la propriété en vertu de laquelle deux corps ne peuvent occuper en même temps la même place.

(*c*) *Divisibilité.*—La divisibilité est la propriété dont jouissent les corps de pouvoir être séparés en parties distinctes.

(*d*) *Porosité.*—Tous les corps présentent dans leur masse de petits espaces vides appelés *pores*, dont l'existence constitue la porosité de la matière.

Volume apparent, volume réel.—Le volume apparent est la portion de l'espace qu'occupe le corps, et le volume réel serait celui qu'occuperait la matière propre du corps si les pores pouvaient être anéantis, c'est-à-dire que le volume réel est le volume apparent diminué du volume des pores. Le volume réel est invariable, mais le volume apparent diminue où augmente avec le volume des pores.

(*e*) *Compressibilité.*—La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir se réduire à un volume moindre par l'effet de la pression. Tous les corps sont compressibles ; les plus compressibles sont les gaz et les moins compressibles, les liquides.

(*f*). *Dilatabilité.* — Les corps étant compressibles sont

dilatables. Les liquides sont moins dilatables que les gaz mais ils le sont plus que les solides.

(*g*) *Elasticité.*—L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur forme, leur état primitif, quand la cause qui change cet état vient à cesser. Ce sont les gaz qui sont les plus élastiques, aussi leur a-t-on donné le nom de *fluides élastiques.*

La force qui tend à produire le retour des molécules vers leur situation primitive de repos s'appelle *force élastique du corps* ou son *ressort.*

(*h*) *Mobilité.*—La mobilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être déplacés, c'est-à-dire mis en mouvement.

Le *mouvement* est l'état d'un corps qui change de position dans l'espace, et le *repos* sa permanence dans le même lieu. Le repos absolu et le mouvement absolu n'existent pas, il n'existe que le repos relatif ou apparent et le mouvement relatif ou apparent.

(*i*). *Inertie.*—L'inertie est l'inaptitude de la matière à passer d'elle-même de l'état de repos à l'état de mouvement ou à modifier le mouvement dont elle est animée.

CHAPITRE TROISIEME.

MÉCANIQUE.

5. Mouvement. (Déf.).—Mouvement rectiligne uniforme. (Déf.).—Vitesse et espace parcouru (formule, déf. et démons.).

(*a*) *Mouvement.*—Le mouvement est l'état d'un corps qui change de position dans l'espace ; le mouvement est relatif.

(*b*) *Trajectoire.*—La trajectoire est le lieu des points

géométriques que le mobile occupe successivement dans l'espace. Suivant que la trajectoire est *rectiligne* ou *curviligne*, le mouvement est rectiligne ou curviligne.

(*c*) *Mouvement uniforme.*—Le mouvement uniforme est celui dans lequel un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux, quelque petits que soient ces temps.

On l'exprime par la formule : $e = Vt$.

C'est-à-dire que l'espace, e, est égal à la vitesse, V, multipliée par le temps t.

(*d*) *Vitesse.*—La vitesse est l'espace parcouru pendant l'unité de temps qui est la seconde.

Le mètre étant pris pour l'unité de longueur, la seconde est l'unité de temps ; on exprime donc la vitesse en mètres par secondes. Ex. : La terre tourne avec une vitesse de 465 mètres par seconde.

Dans le mouvement uniforme, la vitesse est le rapport constant entre l'espace parcouru et le temps employé à le parcourir.

$$V = \frac{e}{t}$$

L'unité de temps est, suivant le cas, la seconde, la minute, l'heure, le jour, etc., etc.

Ex. : Une locomotive fait 62 kilomètres à l'heure quel chemin parcourra-t-elle en 9½ heures ?

$$e = Vt \text{ d'où } e = 62 \times 9.5 = 589 \text{ kilomètres}$$

Ex. : Quelle est la vitesse d'une locomotive qui a franchi, en cinq heures, un espace de 205 kilomètres ?

$$V = \frac{e}{t} \text{ d'où } V = \frac{205}{5} = 41 \text{ kil. par heure.}$$

6. Mouvement varié. — Mouvement uniformément varié accéléré.—Vitesse à un instant donné.—Vitesse moyenne.—Mouvement uniformément retardé.

(*a*) *Mouvement varié.*—Le mouvement varié est celui dans lequel un mobile parcourt en des temps égaux des espaces inégaux.

(*b*) *Mouvement uniformément varié accéléré.*—Le mouvement uniformément varié est celui dans lequel les vitesses varient (croissent ou décroissent) régulièrement de quantités égales dans des temps égaux.

La quantité constante dont varie la vitesse, par chaque unité de temps, est désignée sous le nom d'*accélération.*

Soit : Vo = vitesse initiale du point matériel.
g = l'accélération.
t = le temps.
Vt = vitesse au bout du temps t.

La vitesse au bout du temps t sera évidemment

$$Vt = Vo + gt \qquad [1]$$

Maintenant, si le point matériel part du repos, il n'y aura donc pas de vitesse initiale Vo, et l'expression [1] devient :

$$Vt = gt \qquad [2]$$

L'accélération g étant constante, la vitesse ne doit varier qu'en raison de la variation du temps, d'où la loi :

Loi.—Dans le mouvement uniformément accéléré, la vitesse acquise par un corps partant de l'état de repos croît proportionnellement au temps ; c'est-à-dire qu'après un temps double, triple, quadruple, la vitesse est deux fois, trois, quatre fois plus grande.

(*c*) *Vitesse à un instant donné.*—La vitesse d'un instant donné, dans le mouvement varié, est la vitesse qu'aurait

le mobile si, à partir de l'instant considéré, le mouvement devenait uniforme.

(*d*) *Vitesse moyenne.*—La vitesse moyenne du mouvement uniforme pendant un temps t, est le quotient de l'espace par le temps :

$$V. \text{ moyenne} = \frac{e}{t}$$

Dans le mouvement uniformément varié, la vitesse moyenne est représentée par la moyenne des vitesses extrêmes :

Soit Vo = Vitesse initiale.
" Vt = " extrême.

nous aurons :

$$V \text{ moyenne} = \frac{Vo + Vt}{2} \qquad [3]$$

Mais Vt dans la formule [1] est égal à $Vo + gt$; et en remplaçant Vt dans la formule [3] par sa valeur $Vo + gt$, nous aurons :

$$\text{Vit. moyenne} = \frac{Vo + Vo + gt}{2} = \frac{2\,Vo}{2} + \frac{gt}{2}$$

d'où, en divisant $2\,Vo$ par 2, nous aurons

$$V \text{ moyenne} = Vo + \tfrac{1}{2}\,gt$$

Si, maintenant, dans la formule $e = Vt$, nous portons cette dernière valeur $Vo + \frac{1}{2}\,gt$ en remplacement de V, nous aurons :

$$e = (Vo + \tfrac{1}{2}\,gt)\ t$$

d'où

$$e = (Vot + \tfrac{1}{2}\,gt^2) \qquad [4]$$

et si le point matériel part du repos dans la formule [4], nous ferons disparaître la valeur Vot qui représente la vitesse initiale et nous aurons :

$$e = \frac{gt^2}{2}$$

d'où la loi des espaces : Dans le mouvement uniformément accéléré, l'espace parcouru par un mobile partant de l'état de repos est proportionnel aux carrés des temps employés à les parcourir. C'est-à-dire que, si l'on représente par 1 le chemin parcouru en 1 seconde, les chemins parcourus en 2, 3, 4, 5.... secondes seront représentés par 4, 9, 16, 25. (1)

(c) *Mouvement uniformément retardé.*—Dans le mouvement uniformément retardé, c'est-à-dire que si les variations de vitesse avaient lieu en sens contraire du mouvement initial du point, les formules :

$Vt = Vo + gt$ deviendraient $Vt = Vo - gt$

$e = Vot + \frac{1}{2} gt^2$ " $e = Vot - \frac{1}{2} gt^2$

7. Composition de deux mouvements angulaires uniformes simultanés sans vitesse initiale. (Démonstration).

Théorème. —*Parallélogramme des vitesses.* — *Deux mouve-*

(1) *Démonstration de la loi des espaces* $E = \frac{1}{2} g t 2$. — Dans le mouvement uniforme varié, la vitesse acquise, variant proportionnellement au temps, varie infiniment et croît dans un temps infiniment court (comme la taille d'un enfant qui grandit insensiblement), et on peut la regarder comme sensiblement constante pendant ce temps très court. On peut donc considérer le mouvement uniformément accéléré comme sensiblement et pratiquement identique à une succession de *mouvements uniformes* de durée *égale* et *infiniment courte* et dont chacun aurait pour vitesse la vitesse de son instant final (ou initial).

La durée totale de ces mouvements étant t, il est clair que les vitesses successives seront $g \frac{t}{u}$, $2 g \frac{t}{u}$, $3 g \frac{t}{u}$, etc., etc.

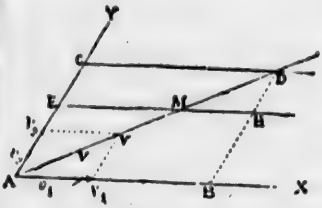
Or, dans une succession de mouvements uniformes d'égale durée et dont les vitesses successives sont entre elles comme la suite des nombres entiers 1, 2, 3, 4.... n, la vitesse moyenne est évidemment la $\frac{1}{2}$ somme des deux vitesses extrêmes, car $\frac{(1 + n) u}{2} : n = \frac{1 + n}{2}$

Donc la vitesse moyenne de ces mouvements uniformes et du mouvement uniformément varié est $\frac{1}{2} (g \frac{t}{u} + g t)$, et comme le [illegible] infiniment court $\frac{t}{u}$ égale zéro, la vitesse moyenne $= \frac{1}{2} g t$.

Par conséquent $E = \frac{1}{2} g t \times t = \frac{1}{2} g t 2$.

ments simultanés, rectilignes et uniformes, se composent en un mouvement rectiligne et uniforme.

La vitesse du mouvement résultant est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les vitesses des mouvements composants.



(Fig. 1.)

Soit, un point A qui parcourt uniformément la droite $A\ X$, en même temps que cette droite se meut parallèlement à elle-même, de sorte qu'au bout du temps t le point A est venu en B sur la droite $A\ X$, et l'extrémité A de cette droite a parcouru uniformément la longueur $A\ C$ sur $A\ Y$; le mobile est alors en un point D tel que $C\ D = A\ B$.

1er. Le mobile pour aller de A en D a suivi la diagonale $A\ D$.

Cherchons, en effet, la position du mobile au bout d'un temps quelconque t' ; si la droite $A\ B$ est alors venue en $E\ H$, le mouvement étant uniforme on a :

$$\frac{A\ E}{A\ C} = \frac{t'}{t}$$

pendant ce même temps t' le point A parcourt sur $A\ B$ une longueur x telle que

$$\frac{X}{A\ B} = \frac{t'}{t}$$

d'où

$$\frac{X}{A\ B} = \frac{A\ E}{A\ C}$$

Mais à cause des triangles semblables $A\ E\ M$ et $A\ C\ D$, et de $C\ D = A\ B$, on a :

$$\frac{E\ M}{A\ B} = \frac{A\ E}{A\ C} \text{ et par suite } \frac{X}{A\ B} = \frac{E\ M}{A\ B}$$

d'où

$$X = \frac{E\ M \times A\ B,}{A\ B} \text{ d'où } X = E\ M$$

Le point A est donc resté constamment sur la diagonale $A\ D$.

2e. Le mobile se meut d'un mouvement uniforme.

Les rapports $\frac{A\ E}{A\ C} = \frac{A\ M}{A\ D} = \frac{t'}{t}$ montrent que le point A se meut sur $A\ D$ d'un mouvement uniforme, puisque les espaces $A\ M$, $A\ D$ sont proportionnels aux temps.

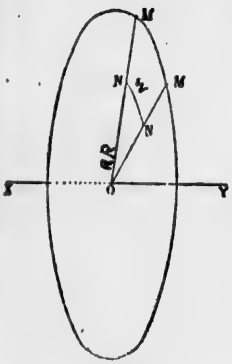
3e. La vitesse du mobile est donnée par la diagonale du parallélogramme construit sur les vitesses des mouvements composants.

Si $A\ V$, et $A\ V2$, représentent les vitesses des mouvements composants, $A\ V$ représente la vitesse du mouvement résultant, car $A\ V$ est l'espace parcouru pendant l'unité de temps.

8. — Mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe ; Vitesse angulaire. (Défin.)

Ce mouvement est celui d'un corps assujetti à une distance constante d'un point fixe ; dans ces conditions un corps est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe, quand tous ses points décrivent des circonférences dont les plans sont perpendiculaires à cet axe.

Tous les points du corps décrivant pendant le même



(Fig. 2.)

temps des arcs semblables dont les longueurs sont dans le rapport de leurs rayons, ainsi on a :

$$\frac{M\,M'}{O\,M} = \frac{N\,N'}{O\,N}$$

en désignant, par e, e', e''..., les chemins parcourus dans le même temps par des points dont les distances à l'axe sont r, r' r''..., on aura

$$\frac{e}{r} = \frac{e'}{r'} = \frac{e''}{r''}....$$

Vitesse angulaire. On appelle vitesse angulaire la vitesse d'un point situé à l'unité de distance de l'axe de rotation ou l'angle que décrit le rayon pendant l'unité de temps.

Cette vitesse angulaire se désigne ordinairement par W.

La vitesse d'un point quelconque est égale au produit de la vitesse angulaire par la distance de ce point à l'axe, c'est-à-dire par r son rayon.

En effet, puisque les espaces parcourus pendant le même temps sont dans le rapport des distances à l'axe, pour un point dont la distance est R on aura

$$\frac{V}{R} = \frac{W}{I}$$

d'où $$V = W\,R$$

dans notre (figure 2.)

$M\,M'$ représente la vitesse V du point M au point M'.
$O\,M$ représente la distance R du centre O au point M.
$N\,N'$ représente la vitesse angulaire W.

9.—Inertie.—Force.—Action et réaction.—Indépendance des forces. (Défin.)

(*a*) Inertie.—Principe de Képler.—Un point matériel en repos ne peut se mettre de lui-même en mouvement. Un point matériel en mouvement ne peut de lui-même modifier ni la grandeur ni la direction de sa vitesse.

(*b*) Force.—On appelle force toute cause capable de produire ou de modifier un mouvement.

(*c*) Action et réaction.—(Principe de Newton). Egalité de l'action et de la réaction. Toutes les fois qu'un point matériel agit sur un autre point matériel, celui-ci réagit sur le premier avec une force égale et de sens contraire.

(*d*) Indépendance des forces.—Lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point matériel, chacune d'elles produit son effet comme si les autres n'existaient pas.

10.—Rapport de deux forces appliquées successivement à un même corps. (Défin.)—Rapport de deux forces appliquées à des corps différents. (Dém.)—Masse des corps. (Défin.)

(*a*) Rapport de deux forces appliquées successivement à un même corps.—Théorème.—Deux forces constantes appliquées successivement à un même point matériel sont entre elles dans le même rapport que les accélérations qu'elles produisent, c'est-à-dire qu'elles impriment des accélérations qui leur sont proportionnelles.

Soit F et F' deux forces constantes.

" g et g' les accélérations qu'elles produisent quand on les applique successivement à un même point matériel.

Supposons que F et F' aient une commune mesure f, et que l'on ait

$$F = n f \text{ et } F' = n' f$$

d'où en divisant membres à membres ces deux égalités nous aurons

$$\frac{F}{F'} = \frac{n f}{n' f}$$

éliminons la qualité f commune au dénominateur et au numérateur dans le deuxième membre et nous aurons

$$\frac{F}{F'} = \frac{n}{n'}$$

Si nous représentons par x l'accélération produite par la force constante f appliquée au point considéré, n forces égales appliquées simultanément à ce point, produiront, d'après le principe de l'indépendance des forces (*g-d*) une accélération $n\,x$: l'accélération g produite par F sera donc $n\,x$, et l'accélération g, produite par F' sera $n'\,x$; ainsi

$$g = n\,x\,;\ g' = n'\,x$$

d'où, divisant membres à membres et diminuant la quantité commune x, nous aurons

$$\frac{g}{g'} = \frac{n}{n'} \qquad [2]$$

Mais l'égalité [1] et l'égalité [2] ayant un rapport commun $\frac{n}{n'}$ nous aurons :

$$\frac{F}{F'} = \frac{g}{g'}$$

Cette dernière proportion peut encore s'écrire

$$\frac{F}{g} = \frac{F'}{g'}$$

Donc deux forces constantes appliquées à un même corps sont proportionnelles aux accélérations qu'elles produisent.

Ce principe permet donc de mesurer les forces par les accélérations de vitesse qu'elles communiquent aux mo-

biles, les forces étant estimées en kilogrammes ou livres et les vitesses en mètres ou pieds.

De plus par l'égalité $\frac{F}{g} = \frac{F'}{g'}$ on voit que, pour un même corps, le rapport entre la force qui le sollicite et l'accélération de vitesse qu'elle lui communique est constant, quelle que soit la force.

(*b*). *Rapport de deux forces appliquées à des corps différents.—Masse des corps.*—Théorème I.—Le rapport de deux forces quelconques appliquées à des corps différents sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles impriment à ces corps.

Théorème II.—La masse d'un corps, résultant de la quantité de matière qu'il contient, est le rapport constant de l'intensité d'une force appliquée à ce corps, si l'accélération du mouvement qu'elle lui imprime, est égale au quotient de la force par l'accélération.

En désignant par M la masse d'un corps on a, par définition du Théorème II,

$$M = \frac{E}{g} \text{ d'où } F = M\,g.$$

C'est-à-dire qu'une force est égale au produit de la masse du corps auquel elle est appliquée, par l'accélération du mouvement qu'elle produit.

Cette valeur $M\,g$ est ce qu'on appelle la *quantité de mouvement ;* souvent l'accélération est remplacée par la vitesse et la valeur devient égale à $M\,V$ au lieu de $M\,g$.

C'est ce rapport constant de la force à l'accélération $\frac{F}{g}$ que les mécaniciens ont adopté pour mesurer la

masse des corps et ils disent que *deux corps sont de même masse, quand, sollicités par des forces égales, ils prennent dans le même temps des accélérations de vitesse égales.*

En représentant par M et m les masses de deux corps, par F et f les forces qui agissent sur eux, et par V et v les vitesses qu'elles leur communiquent dans le même temps, on a donc

$$M = \frac{F}{V} \text{ et } m = \frac{f}{v}$$

d'où

$$F = M\,V \text{ et } f = m\,v$$

divisant ces deux dernières égalités membres à membres, on a

$$\frac{F}{f} = \frac{M\,V}{m\,v} \qquad [1]$$

Le produit $M\,V$ de la masse d'un corps par la vitesse dont il est animé a reçu, comme nous le disons plus haut, le nom de *quantité de mouvement* de ce corps.

Comme nous le voyons, l'égalité [1] nous donne bien l'énoncé du Théorème I. Par conséquent, si l'on prend pour unité de force celle qui imprimerait à l'unité de masse l'unité de vitesse dans l'unité de temps, on voit que les forces peuvent se mesurer par les quantités de mouvement qui leur correspondent.

Les forces étant proportionnelles aux quantités de mouvement, il en résulte que, pour une même force, le produit $M\,V$ est constant, c'est-à-dire que la masse devenant deux, trois fois plus grande, la vitesse est deux, trois fois plus petite. Ce résultat se déduit de la dernière égalité [1], en y faisant $F = f$, ce qui donne :

$$M\,V = m\,v \text{ d'où } \frac{M}{m} = \frac{v}{V}$$

C'est-à-dire *que les vitesses imprimées par une même*

force à deux masses inégales sont en raison inverse de ces masses.

Si $V = v$, on a $\frac{F}{f} = \frac{M}{m}$ c'est-à-dire que *deux forces sont entre elles comme les masses auxquelles elles impriment des vitesses égales.*

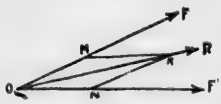
11. Composition des forces.—Composition de deux forces concourantes appliquées à un même point. (Dém.) — Composition d'un nombre quelconque de forces concourantes appliquées à un même point. (Indiquer comment elle se fait.)

(*a*) *Composition des forces.* — Composer des forces, c'est trouver leur résultante. On appelle *résultante* de plusieurs forces une force unique qui peut les remplacer. On nomme *composante* chacune des forces remplacées par la résultante.

(*b*) *Composition de deux forces concourantes appliquées à un même point* : Dans une force il y a trois caractères fondamentaux :

1er Le point d'application.
2e. La direction.
3e L'intensité.

On appelle *forces concourantes* des forces dont les directions passent toutes par le même point. La résultante de ces deux forces est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur ces forces.



(Fig. 3.)

Dans la figure 3 représentons les intensités respectives des forces F et F' par les longueurs Om et On et construisons le parallélogramme $Omrn$ dans lequel Or représentera en

grandeur et en direction la résultante des deux forces $O\,F$ et $O\,F'$. (¹)

(1) On sait que 2 forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles ont acquises après un même temps (10 — a), car $\frac{F}{F'} = \frac{g}{g'} = \frac{g\,t}{g\,t'}$.

Or, soit un point matériel O, sollicité suivant les directions $O\,F$ et $O\,F'$ par 2 forces dont les intensités sont représentées par les longueurs OM et ON. Après un même temps t, les forces ont donné au mobile les vitesses OM et $O\,N$ proportionnelles aux forces, et on a $\frac{O\,B}{O\,C} = \frac{O\,M}{O\,N}$ ou $\frac{O\,B}{O\,M} = \frac{O\,C}{O\,N}$ Les deux vitesses $O\,M$ et $O\,N$ ont pour résultante $O\,D$ d'après le théorème du parallélogramme des vitesses (F. page 9). La force constante R, résultante des deux forces, produit donc, au bout du temps t, la vitesse $O\,R$.

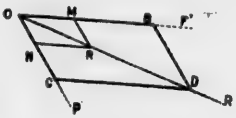


FIG. 3 *bis*

Il faut démontrer 1o que la direction OR de la résultante R est suivant la diagonale du parallélogramme des forces ;

2o Que son intensité est représentée par la longueur de cette diagonale.

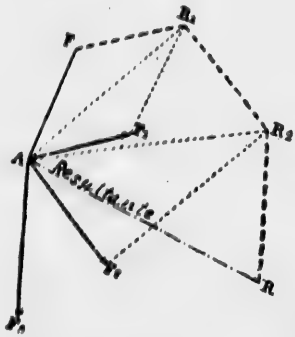
1re Partie.—$O\,R$ est la diagonale du parallélogramme $O\,M\,R\,N$ et se confond avec $O\,D$ diagonale du parallélogramme des forces ; car les triangles $O\,B\,D$ et $O\,M\,R$ sont semblables, ayant l'angle B = M comme compris entre côtés proportionnels $\frac{O\,B}{O\,M} = \frac{O\,C}{O\,N} = \frac{B\,D}{M\,R}$

2e Partie.—D'après le principe de la proportionnalité des forces aux vitesses $\frac{R}{F} = \frac{O\,R}{O\,M}$ mais $O\,B\,D$ et $O\,M\,R$ sont semblables, (1re partie).

Donc $\frac{O\,R}{O\,M} = \frac{O\,D}{O\,B}$ et par conséquent $\frac{R}{F} = \frac{O\,D}{O\,B}$. Il en résulte que si F est représentée par $O\,B$, la résultante R est représentée par la diagonale $O\,D$.

Corollaire 1er.—La résultante de deux forces égale la somme des projections des deux composantes sur la direction de la résultante.

Corollaire 2e. La distance d'un point quelconque de la résultante aux deux composantes est en raison inverse de l'intensité de ces deux composantes, ou autrement un point quelconque de la résultante est à des distances des composantes inversement proportionnelles à leur intensité.



(Fig. 4.)

(*c*) Composition d'un nombre quelconque de forces concourantes appliquées à un même point. — Pour composer les forces F, F_1, F_2, F_3 appliquées au point A, on construit $A\ F\ R_1\ F_1$, parallélogramme des forces F et F_1, qui donne leur résultante $A\ R_1$; on trouve de même $A\ R2$ résultante de R_1 et F_2 ; c'est la résultante des trois forces F, F_1, F_2. En composant R_2 et F_3 on obtient $A\ R$ qui est la résultante des quatre forces données.

Le polygone $A\ F\ R_1\ R_2\ R$ se nomme *polygone des forces*, d'où la règle suivante : pour obtenir la résultante d'un nombre quelconque de forces concourantes, on mène, par l'extrémité d'une des forces, une droite parallèle et égale à une seule force ; par l'extrémité de la droite ainsi obtenue, on mène une droite parallèle et égale à une troisième force, et ainsi de suite, la résultante cherchée est la droite qui ferme le polygone, c'est-à-dire la droite qui joint le point d'application des forces à l'extrémité de la parallèle à la dernière des forces.

Condition d'équilibre.—Pour que les forces appliquées à un point soient en équilibre, il faut et il suffit que leur résultante soit nulle, c'est-à-dire que le polygone des forces se ferme de lui-même.

$$F\ R_1 = F_1\ ;\ R_1\ R_2 = F_2\ ;\ R - F_3.$$

12. Composition de deux forces parallèles. (Dém.)— Composition d'un nombre quelconque de forces parallèles. (Indiquer comment elle se fait).—Centre des forces parallèles. (Déf.)

(*a*) *Composition de deux forces parallèles :* —

1er. Les forces sont de même sens.—Théorème.—La résultante d'un système de deux forces parallèles de même sens, appliquées en deux points d'un corps solide, est parallèle à ces forces, de même sens qu'elles et égale à leur somme.

Son point d'application divise la droite qui joint les points d'application de ces forces, en parties inversement proportionnelles aux intensités des composantes.

(Fig. 5.)

1°. Soit P et Q, deux forces parallèles aux points A et B d'un solide.

Prouvons d'abord que la résultante est égale à leur somme.

Pour cela, aux points A et B appliquons en ligne droite, avec $A\ B$, deux forces M et N, de grandeur arbitraire, mais égales et de sens contraire ; l'état du système n'aura pas changé.

Les forces M et P ont S pour résultante ; N et Q ont pour résultante T. Ces deux forces S et T peuvent être transportées à leur point de concours D, ces points étant supposés invariablement liés au solide. Par le point D menons une parallèle à $A\ B$ et une autre à $A\ P$; les forces S' et T' peuvent être remplacées par leurs composantes M', P', et N', Q'', suivant ces directions ; les forces M' et N' se faisant équilibre, le système donné est ramené aux forces P' et Q'. Leur résultante, qui est celle du système, est égale à leur somme, c'est-à-dire $R = P + Q$ en vertu du principe que *quand plusieurs forces agissent dans le même sens, leur résultante est égale à leur somme.*

Donc les forces P et Q ont une résultante parallèle à ces forces et égale à leur somme.

2°. Transportons la résultante que nous venons de trouver au point C, où sa direction rencontre $A\ B$ (1) ; il reste à démontrer que le point C divise $A\ B$ en parties inversement proportionnelles aux forces P et Q.

Les triangles semblables $A\ C\ D$ et $S'\ P'\ D$ d'une part, $B\ C\ D$ et $T'\ Q'\ D$ d'autre part, donnent les relations suivantes :

$$\frac{A\ C}{S'\ P'} = \frac{D\ C}{D\ P'} \text{ ou } \frac{A\ C}{M} = \frac{D\ C}{P} \qquad [1]$$

$$\frac{B\ C}{Q'\ T'} = \frac{D\ C}{D\ Q'} \text{ ou } \frac{B\ C}{M} = \frac{D\ C}{Q} \qquad [2]$$

à cause de $P'\ S' = Q'\ T'$; d'où, en divisant membre à membre [1] et [2], $\frac{A\ C}{B\ C} = \frac{Q}{P}$

Ainsi le point C divise $A\ B$ en parties inversement proportionnelles aux forces P et Q.

Donc la résultante d'un système de deux forces parallèles et de même sens est parallèle à ces forces, de même sens qu'elles et égale à leur somme.

2e. Les forces sont de sens contraire.—Théorème.—La résultante d'un système de deux forces parallèles, inégales, de sens contraire, est parallèle à ces forces, dirigée dans le sens de la plus grande et égale à leur différence.

(1) Et cela en vertu du théorème que sans changer l'effet d'une force qui sollicite un corps en équilibre, on peut transporter son point d'application en un point quelconque de sa direction, pourvu que le nouveau point d'application soit invariablement lié au premier.

Le point d'application de la résultante est sur le prolongement de la droite qui joint les points d'application des composantes, du côté de la plus grande ; ses distances aux points d'application des deux composantes sont en raison inverse des intensités de ces forces.

Soit P et Q deux forces parallèles de sens contraires, la force P peut se remplacer par deux autres, l'une Q' appliquée au point B, égale et directement opposée à Q, l'autre égale à $P - Q$ appliquée en un point C de manière qu'on ait :

$$\frac{A\,B}{A\,C} = \frac{P - Q}{Q}$$

(Fig. 6.)

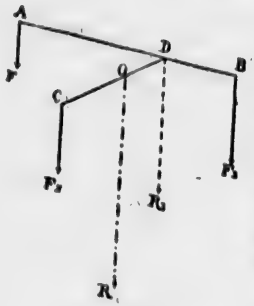
La force P ayant été remplacée par ses composantes, le système est ramené aux forces Q, Q' et $P - Q$; or Q et Q' se détruisent ; il ne reste que la force $P - Q$, qui est la résultante du système, ce qui prouve la première partie de l'énoncé ; il reste à démontrer la seconde.

Dans la proportion $\frac{A\,B}{A\,C} = \frac{P - Q}{Q}$, en ajoutant chaque dénominateur à son numérateur on obtient :

$$\frac{A\,B + A\,C}{A\,C} = \frac{P - Q + Q}{Q} \quad \text{d'où} \quad \frac{B\,C}{A\,C} = \frac{P}{Q}$$

Donc la résultante de deux forces parallèles, de sens contraires, est.....

(*b*) *Composition d'un nombre quelconque de forces parallèles.*—Pour obtenir la résultante de plusieurs forces parallèles, on compose deux de ces forces, puis leur résultante avec une troisième, et ainsi de suite.



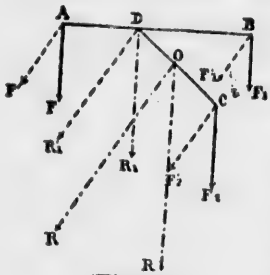
(Fig. 7.)

Par exemple, les forces F et F_1 ont R_1 pour résultante ; R_1 et F_2 ont pour résultante R qui est celle des trois forces données. Quand les forces données sont de sens contraires, on compose d'abord les forces d'un même sens, puis celles de l'autre sens, et enfin les deux résultantes obtenues.

Si ces deux résultantes sont inégales, elles donnent une résultante unique, qui est celle du système. Si elles sont égales et appliquées en des points différents, elles forment un couple. Si elles sont égales et directement opposées, le système est en équilibre.

On voit que la résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles est égale à la somme algébrique de ces forces.

(c) *Centre des forces parallèles.* (Défin).—On appelle centre d'un système de forces parallèles le point d'application de leur résultante.



(Fig. 8.)

La composition des forces parallèles montre que le point d'application de la résultante ne dépend que de la position des points d'application des composantes et des rapports de leur intensité.

Ce point ne change pas si les forces tournent autour de leurs points d'application tout en restant parallèles. Ainsi le point O est le point d'application de la résultante des forces F' F'_1, F'_2 aussi bien que des forces F, F_1, F'_2.

Ce point ne change pas non plus si les intensités des forces varient, pourvu que leurs rapports ne changent pas.

Cette propriété remarquable a fait donner à ce point le nom de *centre des forces parallèles.*

13. Centre de gravité. (Déf.) ; principes généraux pour sa détermination (Enoncé).— Détermination du centre de gravité du triangle et du tétraèdre. (Dém.).

(a) Centre de gravité ; principes généraux pour sa détermination :

On appelle centre de gravité d'un corps le point d'application de la résultante de toutes les actions que la pesanteur exerce sur les différents points de ce corps.

Ces actions sont dirigées suivant des verticales.

Principes généraux.—1°. Lorsqu'un corps peut se décomposer en plusieurs parties dont les centres de gravité sont sur une droite ou dans un plan, le centre de gravité du corps est sur cette droite ou dans ce plan.

2°. Si une surface plane possède un *diamètre rectiligne*, le centre de gravité est sur ce diamètre.

On nomme *diamètre rectiligne* d'une surface plane la droite qui partage, en deux parties égales, toutes les cordes de cette surface parallèles à une certaine direction.

3°. Si une surface ou un volume a un *plan diamétral*, le centre de gravité de la surface ou du volume est sur ce plan.

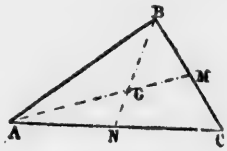
On nomme *plan diamétral* le plan qui partage en deux parties égales les cordes d'une surface parallèle à une même direction.

4°. Si une figure possède un centre, un axe ou un *plan de symétrie*, son centre de gravité est, en ce centre, sur cet axe ou dans ce plan.

Le plan de symétrie est un plan diamétral perpendiculaire aux cordes qu'il divise en deux parties égales ;

de même le diamètre prend le nom *d'axe de symétrie* lorsque les cordes lui sont perpendiculaires.

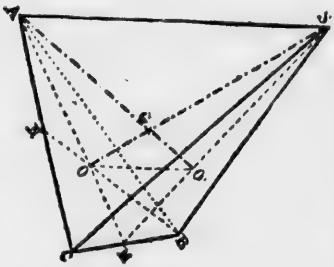
(*b*) Détermination du centre de gravité des triangles et du tétraèdre..... *Triangle.*—Le centre de gravité de la surface d'un triangle est au point de concours des médianes.



(Fig. 9).

La médiane *B N* est un diamètre de la figure, puisqu'elle divise en deux parties égales toutes les parallèles à *A C* ; elle contient donc le centre de gravité ; il en est de même d'une autre médiane *A M* ; le centre cherché devant se trouver sur ces deux lignes il est à leur intersection *G*, c'est-à-dire au 2-3 de chaque médiane à partir du sommet.

Tétraèdre.—Le centre de gravité d'une pyramide est sur la droite qui joint le sommet au centre de gravité, de la base aux ¾ de cette droite à partir du sommet.



(Fig. 10.)

Tétraèdre. — Le plan *S A M*, qui passe par le milieu de *B C*, est un plan diamétral ; il en est de même du plan *S B N* ; le centre de gravité appartient donc à chacun de ces plans, et, par suite, à leur intersection *S O* ; cette droite joint le sommet *S* au point *O*, centre de gravité de la face *A B C*.

De même, le centre de gravité de la pyramide est sur *A O'*, qui joint le sommet *A* au centre de gravité de la face *B S C* ; ces deux droites *S O* et *A O*, étant dans un même plan *S A M*, se coupent en un point *G* qui est le centre cherché.

Or, à cause des triangles semblables $G\ O\ O'$ et $G\ S\ A$, puis $M\ O\ O'$ et $M\ A\ S$, on a :

$$\frac{O\ G}{G\ S} = \frac{O\ O'}{A\ S} = \frac{O\ M}{A\ M}$$

Mais $$\frac{O\ M}{A\ M} = \frac{1}{3}$$

donc $$\frac{O\ G}{G\ S} = \frac{1}{3}$$

par suite $$\frac{O\ G}{O\ S} = \frac{1}{4} \text{ et } \frac{S\ G}{S\ O} = \frac{3}{4}$$

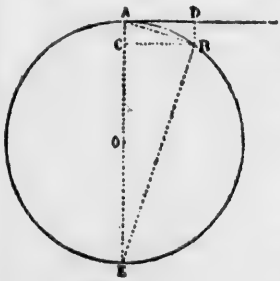
donc le centre de gravité.....

14. Force centripète et force centrifuge, (Déf.) ; leur expression algébrique. (Dém.).

La force centrifuge est la force d'inertie qui tend à éloigner du centre un corps en mouvement de rotation ; la force centripète lui est égale et opposée.

Mesure de la force centrifuge.—Pour obtenir l'intensité de la force centrifuge, nous allons calculer celle de la force centripète, qui lui est égale.

Soit un mobile A, parcourant une circonférence O d'un mouvement uniforme de vitesse V ; supposons qu'il ait parcouru l'arc $A\ B$ pendant un temps très court t, le mouvement étant uniforme on a :



(Fig. 11.)

$$\text{Arc } A\ B = V\ t$$

Mais le chemin $A\ B$ peut être considéré comme résultant de deux chemins composants, l'un $A\ D$ suivant la tangente, l'autre $A\ C$ suivant

le rayon, ce chemin $A\ C$ est celui qui serait dû à la force centripète.

A cause des triangles rectangles $A\,B\,E$ et $A\,C\,B$ on a :

$$\frac{A\ C}{A\ B} = \frac{A\ B}{A\ E} \quad \text{d'où } A\ C = \frac{A\ B^2}{2\ R}$$

L'arc $A\ B$ étant très petit, on peut prendre la longueur de l'arc pour celle de la corde, et mettre Vt à la place de $A\ B$; l'égalité devient

$$A\ C = \frac{V^2\ t^2}{2\ R}$$

Ce qui montre que l'espace $A\ C$ a été parcouru d'un mouvement uniformément accéléré dont l'accélération est $\frac{V^2}{R}$. En appelant g cette accélération on a

$$g = \frac{V^2}{R}$$

désignons par x l'intensité de la force centripète et par m la masse du mobile, on a :

$$x = m\ g$$

d'où, en remplaçant g par sa valeur $\frac{V^2}{R}$, on a

$$x = \frac{m\ V^2}{R}$$

donc l'intensité de la force centrifuge est proportionnelle à la masse du mobile, au carré de la vitesse et inversement proportionnelle au rayon.

Remarque 1.—La formule $x = \frac{m\ V^2}{R}$ montre que la force centrifuge ne peut être nulle que pour

$V = 0$ c.-à-d. aux pôles

où $R = x$ l'infini

c'est-à-dire si le corps est au repos ou s'il se meut en ligne droite.

Note.—Sous l'équateur, la force centrifuge est directement opposée à la pesanteur et égale $\frac{1}{292}$ de son intensité, c'est-à-dire le volume de l'aplatissement polaire. Or 292 étant sensiblement le carré de 17, si le mouvement de rotation de la terre était 17 fois plus rapide, la force centrifuge qui est proportionnelle au carré de la vitesse serait, sous l'équateur, 292 fois plus intense qu'elle ne l'est, c'est-à-dire égale à la pesanteur, et les corps ne pèseraient pas ; pour un mouvement plus rapide, ils seraient lancés dans l'espace par l'effet de la force centrifuge.

La force centrifuge atteint son maximum à l'équateur et devient entièrement nulle aux pôles.

Remarque 2. — Ordinairement, on exprime la force centrifuge en fonction de la vitesse angulaire W du point A; il suffit de diviser la vitesse linéaire V par le rayon R ; donc

$$W = \frac{V}{R}$$

d'où

$$V = W R$$

En mettant cette valeur de V dans la formule $x = \frac{m V^2}{R}$ on obtient : $x = m W^2 R$.

15. Travail des forces. (Déf. et notion succincte).— Valeur du travail d'une force constante appliquée à un point dont le déplacement est rectiligne. (Dém.)— Unités de travail.

(a) *Travail des forces.*—Le travail d'un manœuvre se mesure non seulement par l'effort, mais encore par le chemin le long duquel il a été produit.

Ex. : Un homme qui élève 50 kilos à une hauteur de un mètre produit un travail deux fois plus grand que s'il n'avait élevé que 25 kilos à la même hauteur.

De même l'ouvrier, qui élève 50 kilos à deux mètres

de hauteur, fait deux fois plus de travail que celui qui élève les 50 kilos seulement à un mètre.

Mais si le poids P et la hauteur h varient en sens inverse, de manière que leur produit reste constant, le manœuvre aura toujours à dépenser la même somme d'efforts.

Le produit $P h$ peut donc servir à mesurer son travail.

(*b*). *Valeur du travail d'une force constante appliquée à un point dont le déplacement est rectiligne.*

On appelle travail d'une force constante, dont le point d'application se déplace suivant la direction de cette force, le produit de l'intensité de la force par la longueur du chemin parcouru.

(Fig. 12.)

Le travail d'une force F se désigne par $T\ F$.—Ainsi, en appelant e le déplacement $A\ A'$ (c'est-à-dire la longueur du chemin parcouru) du point d'application de la force F on a, par définition.

$$T\ F = F + E$$

Ex. : Si un homme élève 25 kilos à 12 mètres de hauteur en 1 minute, son travail mécanique $T\ F$ par seconde est

$$\frac{25 \times 12}{60} = 5 \text{ kilogrammètres.}$$

(*c*). *Unités de travail.*—Les unités adoptées sont le *kilogrammètre* et le *cheval-vapeur*.

Le kilogrammètre est le travail nécessaire pour élever un poids d'un kilo à une hauteur d'un mètre ; le kilogrammètre est indépendant du temps, parce que le travail produit est le même, quel que soit le temps qu'on y ait employé.

On peut aussi prendre la *livre pied*.

On nomme *Cheval-vapeur* un travail de 75 kilogrammètres par seconde.

Ce travail est bien supérieur à celui que peut fournir un cheval ordinaire. Car un cheval attelé à un manège peut travailler 8 heures par jour en développant un travail de 41 kgm. par seconde ; ce qui nous donne pour 8 heures 1,180,800 kgm. dans une journée ; tandis que 75 kgm. par seconde pendant 24 heures donnent 6,480,000 kgm. D'après cela une machine de la force d'un cheval-vapeur peut fournir plus de travail que 5 chevaux se remplaçant de manière que chacun ait 8 heures de travail toutes les 24 heures.

16. Force vive. (Défin.). — Démontrer sa relation avec le travail.

(*a*) *Force vive.*—On nomme *force vive* d'un point matériel en mouvement le produit de sa masse par le carré de sa vitesse en mètres ou en pieds, d'où, en appelant W force vive, l'expression suivante

$$W = m V^2 \quad [1]$$

D'un autre côté nous avons vu (10-b) que la quantité de mouvement qu'un corps possède, à un moment donné, est le produit de la masse de ce corps par sa vitesse à l'instant considéré $M\ V$; nous avons aussi vu (10-b) que la masse M d'un corps est égale au quotient de la force F par l'accélération g, c'est-à-dire $M = \frac{F}{g}$; mais quand la force considérée est le poids du corps, cette formule devient $M = \frac{P}{g}$ alors si, dans notre équation [1], nous remplaçons M par sa valeur $\frac{P}{g}$, elle deviendra

$$W = \frac{P}{g} \times V^2$$

Puissance vive.—Il existe entre *la force vive* que possède un corps en mouvement et le *travail mécanique* ou

la *valeur du travail* qu'il a fallu dépenser pour lui imprimer la vitesse dont il est animé, cette relation simple que le travail est la moitié de *la force vive*,

$$\text{c'est-à-dire} \quad T.\,F = \frac{1}{2}\,M\,V^2 \text{ ou } = \frac{1}{2}\,\frac{P}{g} \times V^2$$

C'est cette relation que l'on appelle *Puissance vive*.

En effet, si une force F imprime, dans le temps t, la vitesse V à une masse M, la quantité de mouvement communiquée dans l'unité de temps est $\frac{M\,V}{t}$; par suite, prenant pour unité de force celle qui imprime l'unité de vitesse à l'unité de masse dans l'unité de temps, on a

$$F = \frac{M\,V}{t}, \quad [2]$$

Mais la vitesse du mobile passant de zéro à V, sa vitesse moyenne est $\frac{V}{2}$ et le chemin E parcouru dans le temps t est $\frac{V}{2} \times t$; donc on a

$$F = \frac{V\,t}{2} \quad [3]$$

Multipliant membre à membre les égalités [2] et [3] il vient

$$F \times E = \frac{M\,V}{t} \times \frac{V\,t}{2} \quad [4]$$

Mais $F + E = T\,F =$ travail mécanique ou valeur du travail (15-b) ; donc nous aurons, en remplaçant dans l'égalité [4] $F + E$ par sa valeur $T\,F$ et en faisant disparaître la valeur t commune au numérateur et au dénominateur, l'expression suivante :

$$T\,F = \tfrac{1}{2}\,M\,V^2$$

égalité que l'on exprime en disant : *que la puissance vive*

d'un corps s'obtient en multipliant sa masse par le carré de sa vitesse en mètres ou pieds et en prenant la moitié du produit.

Pour faire passer un corps du repos à la vitesse V, il faut dépenser une quantité de travail égale à la puissance vive du corps, c'est-à-dire

$$\tfrac{1}{2}\, M\, V^2 \text{ ou } \tfrac{1}{2}\, \frac{P}{g} \times V^2$$

Pour faire passer un corps de la vitesse V à la vitesse V', il faut développer un travail égal à la différence des quantités de travail correspondant à chacune des deux vitesses, c'est-à-dire à la puissance vive de la fin diminuée de la puissance vive du commencement.

$$\tfrac{1}{2}\, M\, V'^2 - \tfrac{1}{2}\, M\, V^2$$

$$\text{d'où } \tfrac{1}{2}\, M\, (V'^2 - V^2).$$

17. Machines simples. (Déf.).—Levier.—Poulie fixe.—Poulie mobile.— Moufles.— Treuil.— Plan incliné.— Vis. (Relation entre la puissance et la résistance, Dém.).—(Note 3.)

(*a*) *Machines simples.*—On nomme machine un corps ou un ensemble de corps gênés dans leurs mouvements par des obstacles fixes, et destinés à transmettre l'action des forces.

(Note 3) *Principe.*—Tout le temps qu'une machine a sa *marche normale* animée d'un *mouvement uniforme*, c'est que les forces P et Q qui agissent sur cette machine font le *travail moteur* Tm égal au *travail résistant* Tr, on a $Tm = Tr$.

En effet, la somme du travail des forces appliquées à une machine étant mesurée par la demi-variation des forces vives, est après chaque instant

$$Tm - Tr = \frac{m\, V'^2}{2} - \frac{m\, V^2}{2} \quad [1]$$

or le mouvement étant uniforme $V^2 = V'^2$; c'est-à-dire $\frac{m\, V'^2}{2} = \frac{m\, V^2}{2}$

notre équation [1] deviendra donc

$$Tm - Tr = O \quad \text{d'où} \quad Tm = Tr$$

or le travail moteur Tm représente la puissance Pe (e = l'espace parcouru) et le travail résistant Tr représente la résistance Qe' ce qui nous donnera

$$Tm = Tr \quad \text{ou} \quad Pe = Qe$$

Une *machine simple* est un corps solide gêné par un obstacle et destiné à transmettre l'action des forces.

Une machine simple se nomme :

Levier, quand l'obstacle est un point fixe ;

Treuil ou Tour, quand l'obstacle est un axe fixe ;

Plan incliné, quand l'obstacle est un plan fixe.

Le *levier* peut tourner en tous sens autour d'un point fixe.

Tout point du *Treuil* décrit une circonférence dont le plan est perpendiculaire à l'axe fixe.

Le corps glisse le long du *plan incliné* sur lequel il s'appuie.

(*b*) *Levier.*—Un levier est un corps solide, mobile autour d'un point fixe.

On donne ordinairement au levier la forme d'une barre.

Le point fixe se nomme *point d'appui.*

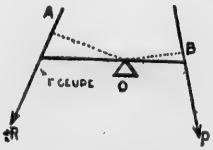
Lorsque le levier est soumis à l'action de deux forces, l'un prend le nom de *puissance*, l'autre celui de *résistance.*

On appelle *bras de levier* les perpendiculaires abaissées du point d'appui sur les directions des forces appliquées au levier.

Genres de leviers.—Suivant les positions relatives du point d'appui, de la puissance et de la résistance, on distingue trois genres de leviers.

1*er Genre.*—Le point d'appui est entre la puissance *P* et la résistance *R.*

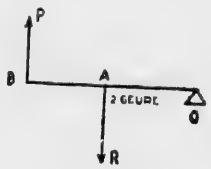
(Fig. 13.)



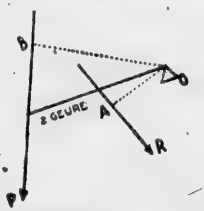
(Fig. 14.)

Ex. : pince du maçon, balances, ciseaux, etc., etc.

2e. Genre.—La résistance est entre la puissance et le point d'appui.



(Fig. 15.)

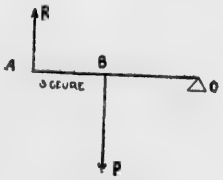


(Fig. 16.)

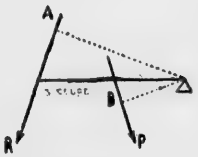
Ex. : le couteau du boulanger, la brouette, le casse-noisette. Une rame qui fait mouvoir une barque, le point d'appui est l'eau ; l'embarcation, la résistance ; le bras du rameur, la puissance.

Ordinairement, dans le second genre, le bras de levier de la puissance est plus grand que celui de la résistance, alors ce bras de levier est favorable à la puissance.

3e Genre.—Dans le levier du troisième genre, la puissance est entre la résistance et le point d'appui.



(Fig. 17.)



(Fig. 18.)

Ex. : La pédale du tourneur. Dans le levier du troisième genre, le bras de levier de la résistance est ordinairement plus grand que celui de la puissance ; ce genre de levier est donc défavorable à la puissance, mais il est favorable à la vitesse.

Dans un levier, pour qu'il y ait équilibre, il faut que la puissance P, multipliée par son bras de levier, soit égale à la résistance R multipliée par son bras de levier ; d'où l'on a : (1)

$$P \times OB = R \times OA$$

d'où $$P = \frac{R \times OA}{OB} ; \quad R = \frac{P \times OB}{OA}$$

d'où $$OB = \frac{R \times OA}{P} ; \quad OA = \frac{P \times OB}{R}$$

(1) *Corollaire.*— Etant connu e le déplacement du point d'application P et e' le déplacement du point d'application de Q dans une machine ayant son mouvement uniforme, il est facile de *déterminer le rapport* $\frac{P}{Q}$ qui égale $\frac{e'}{e}$

Applications.— I, *Levier.* — Supposons P et Q appliqués en B et A et agissant chacune tangentiellement à la circonférence de son bras de levier, de manière à garder toujours le même bras de levier BC et AC.

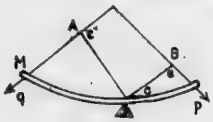


Fig. 18 *bis*

Leurs travaux seront P x arc e.
Q x arc e'

Les arcs e et e' ont évidemment le même nombre de degrés (ils ont même centre) (mouvement circulaire — 8) et sont semblables. Donc leurs longueurs respectives sont proportionnelles à leurs rayons $\frac{e'}{e} = \frac{CA}{CB}$ or $\frac{P}{Q} = \frac{e'}{e}$ donc $\frac{P}{Q} = \frac{CA}{CB}$.

Fig. 18 *ter*

NOTA.— Autre manière d'arriver à la même conclusion. Une machine en mouvement uniforme marche en vertu de l'inertie par la vitesse acquise. Les forces P et Q, qui agissent continuellement sur elle, se font équilibre, sans quoi elles auraient une résultante qui, agissant constamment, imprimerait à la machine un mouvement varié.

(c) *Poulie fixe.*—Une poulie est un disque mobile autour de son axe.—Lorsque la poulie doit être mue au moyen de cordes ou de chaînes, son contour est creusé d'une rainure appelée gorge.

Une chape supporte les extrémités de l'axe de la poulie ; parfois la poulie tourne librement autour de son axe, qui est alors fixé invariablement à la chape ; d'autres fois l'axe fait corps avec la poulie, et ses extrémités, nommées tourbillons, tournent dans les ouvertures de la chape.

Nous supposerons que le cordon est parfaitement flexible, qu'il peut glisser sans frottement sur la gorge de la poulie, et enfin que son diamètre et son poids sont négligeables.

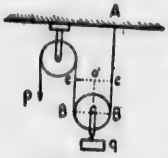
On distingue 1° la poulie fixe dont l'axe repose sur des supports fixes ; 2° la poulie mobile dont l'axe se déplace pendant que la poulie tourne.

La chape d'une poulie fixe est assujétie d'une manière invariable ; ou bien elle est suspendue à un point fixe par un crochet, de manière à pouvoir prendre une orientation convenable, suivant la direction des forces. La puissance et la résistance agissent aux extrémités du cordon.

Dans une poulie fixe pour qu'elle soit en équilibre, il faut et il suffit que la puissance soit égale à la résistance, ou que l'effort exercé à une des extrémités de la corde soit égale à la charge à soulever ou à l'effort à vaincre. (*Voir note 3, page 33.*)

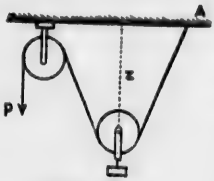
La poulie fixe n'est guère employée que pour changer la direction de la force, aussi la nomme-t-on *poulie de renvoi.*

(d) *Poulie mobile.*—La poulie mobile est posée sur le cordon, qui embrasse une partie de la gorge ; une



(Fig. 19.)

extrémité de ce cordon est attachée à un point fixe A ; l'autre extrémité est sollicitée par la puissance. La chape est terminée par un crochet auquel est appliquée la résistance, qui ordinairement est un corps Q à soulever. (1)



(Fig. 20.)

Pour que la poulie mobile soit en équilibre dans le cas où les deux brins (fig. 19) passant sur elle sont parallèles, il faut que l'effort P exercé à l'extrémité de la corde soit la moitié de la charge Q à soulever ou de l'effort à vaincre.

En effet, soit $O\,o'$ la hauteur dont la poulie, et par suite la charge Q s'est élevée ; chacun des cordons s'est raccourci de $O\,o'$, la puissance P s'est donc déplacée de $2\,O\,o'$.

Dans l'équation du travail,

travail moteur $Pm = Q\,n$ travail résistant.

On a donc $m = 2\,n$

par suite $P \times 2n = Qn$

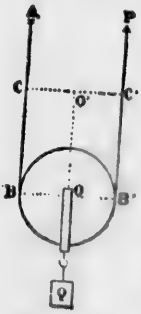


Fig. 19 *bis*

d'où $\dfrac{P}{Q} = \dfrac{1}{2}$ d'où $P = \dfrac{Q}{2}$

C'est-à-dire que la puissance est à la charge comme 1 est à 2, donc moitié moins forte.

(1) III. *Poulie mobile.* — Supposons les *cordons parallèles.* Si le fardeau s'est élevé de $AA' = 1$ mètre avec travail $Q \times AA'$, chacun des cordons s'est raccourci de $1m$ et la puissance a dû se déplacer du double (2 fois AA').

Or $\dfrac{P}{Q} = \dfrac{e'}{e} = \dfrac{AA'}{2\,AA'} = \dfrac{1}{2}$. La puissance $= \dfrac{1}{2}$ de la résistance.

Dans le cas de la figure 20, où au contraire les brins ne sont pas parallèles, on a

$$\frac{P}{Q} = \frac{1}{2 \cos 2} \text{ d'où } P = \frac{Q}{2 \cos 2}; \; Q = 2 P \cos 2.$$

(Fig. 21.)

(*e*) *Moufles ou Palan.*—Une moufle est formée de plusieurs poulies réunies dans une même chape ; tantôt les poulies sont inégales et ont chacune un axe particulier ; tantôt elles sont égales et placées sur le même axe ; dans ce cas elles doivent tourner librement autour de cet axe, car ces poulies n'ont pas la même vitesse.

L'assemblage de deux moufles de même espèce se nomme palan. Un palan est en équilibre quand la puissance est égale à la résistance divisée par le nombre de cordons qui réunissent la moufle ; ou encore, la puissance égale la résistance divisée par le nombre de poulies.

Dans la figure 21 on a six poulies ou bien six cordons ; nous aurons donc pour l'expression de P

$$P = \frac{Q}{6} \text{ d'où } Q = P \times 6.$$

(Voir note page suivante).

(*f*) *Treuil.*—Le treuil est un corps assujéti à tourner autour d'un axe fixe.

Il se compose d'un cylindre terminé par deux tourillons ; les *tourillons* sont des cylindres de même axe que le cylindre principal, mais de rayon plus petit ; ils reposent sur des supports fixes nommés coussinets.

(Fig. 22.)

La résistance est fixée à une corde qui s'enroule sur le cylindre. La puissance agit tangentiellement à une circonférence dont le plan est perpendiculaire à l'axe du cylindre, soit au moyen d'une roue, souvent remplacée par une manivelle ; soit au moyen de leviers qui traversent le treuil. (²)

Pour l'équilibre du treuil il faut que la puissance et la résistance tendent à faire tourner le treuil en sens contraires et qu'elles soient en raison inverse des rayons de la roue du cylindre.

En appelant P l'effort exercé en A et Q la charge à

Fig. 21 *bis*

(1) IV. *Moufle.* — Supposons une moufle composée de 2 poulies mobiles et d'autant de fixes. — Si le fardeau s'élève de $AA' = 1$ *met.* avec travail $Q \times AA'$, chacun des 4 cordons se raccourcit de $AA' = 1m$ et la puissance doit se déplacer du quadruple $4\,AA'$. Donc, $e = e' \times$ nombre de cordons ou nombre de poulies.

$$Pe = Pe' \times \text{nombre de cordons} = Qe'$$

$$P \times \text{nombre de cordons} = Q$$

$$P = \frac{Q}{\text{nombre de cordons ou de poulies}}$$

(2) V. *Treuil.* — Si le treuil fait un tour, P tangentielle à la grande circonférence se déplace et son point d'application fait un tour :

$$Pe = 2\,\pi\,R\,P$$

Q tangentielle à la petite circonférence se déplace et son point d'application fait un tour :

Fig. 22 *bis*

$$Qe' = 2\,\pi\,R\,Q$$

or $\quad Pe = Qe'\,;\; 2\,\pi\,R\,P = 2\,\pi\,R\,Q\,;\; R\,P = r\,Q\,;\; \dfrac{P}{Q} = \dfrac{R \text{ de } Q}{R \text{ de } P}$

La puissance P et la résistance Q sont en raison inverse des rayons des circonférences où elles agissent, les rayons sont leur bras de levier.

soulever ou l'effort à vaincre nous aurons, d'après l'énoncé :

$$\frac{P}{Q} = \frac{C\,B}{C\,A} \text{ d'où } P \times C\,A = Q \times C\,B$$

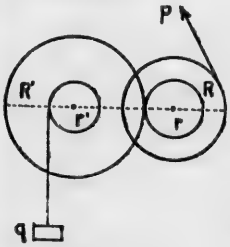
(*Voir note 3.*)

$$\text{d'où} \quad P = \frac{Q \times C\,B}{C\,A}\,; \quad Q = \frac{P \times C\,A}{C\,B}\,;$$

$$\text{d'où} \quad C\,A = \frac{Q \times C\,B}{P}\,; \quad C\,B = \frac{P \times C\,A}{Q}$$

Ex. de treuils : Cabestans ; treuil de carrières ou roue à chevilles.

(*g*). *Treuils à engrenages.*—Pour obtenir au moyen du treuil une grande puissance, sans donner à la roue motrice de trop grandes dimensions, on se sert du treuil à engrenages.



(Fig. 23.)

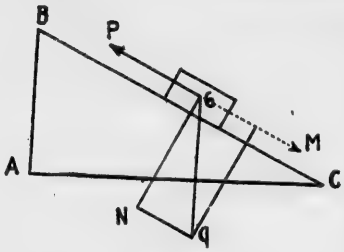
La puissance agit sur les deux manivelles, et par l'intermédiaire d'une petite roue dentée, appelée pignon, elle fait tourner une roue dentée de plus grand diamètre, fixée au cylindre du treuil.

La puissance multipliée par le produit des rayons des roues est égale à la résistance multipliée par le produit des rayons des pignons.

$$P \times R\,R' = Q \times r\,r'$$

$$\text{d'où} \quad P = \frac{Q \times r\,r'}{R\,R'}\,; \quad Q = \frac{P \times R\,R'}{r\,r'}$$

(*h*) *Plan incliné.*—On appelle plan incliné un plan qui fait avec l'horizon ou un plan horizontal un angle moindre qu'un angle droit.



(Fig. 24.)

Lorsque la puissance exercée pour soulever le corps est parallèle au plan incliné on a :

1°. La puissance multipliée par la longueur égale le poids multiplié par la hauteur, c'est-à-dire $P \times l = Q \times h$.

2°. La pression sur le plan multipliée par la longueur égale le poids multiplié par la base, c'est-à-dire $N \times l = Q \times b$.

Soient $A\ B$ la hauteur du plan incliné $A\ B = h$.
" $A\ C =$ sa base $A\ C = b$.
" $B\ C$ une de ses lignes de plus grande pente $B\ C = l$.

Désignons par P la force parallèle à $B\ C$, qui équilibre le corps. Nous la supposerons appliquée au centre de gravité G.

Le poids Q se décompose en deux forces : l'une $G\ M$ parallèle au plan ; l'autre $G\ N$ normale à ce plan.

La force $G\ N$ est détruite par la résistance du plan incliné. La force P doit être égale et directement opposée à $G\ M$; nous allons la calculer.

Les triangles rectangles semblables $A\ B\ C$ et $M\ G\ Q$ donnent

$$\frac{G\ M}{G\ Q} = \frac{A\ B}{B\ C}$$

ou

$$\frac{P}{q} = \frac{h}{l} \text{ d'où } P \times l = q \times h$$

3°. En désignant par N la pression sur le plan, nous aurons :

$$\frac{G\ N}{G\ Q} = \frac{A\ C}{B\ C}$$

d'où $\frac{N}{q} = \frac{b}{l}$ d'où $N \times l = q \times b$

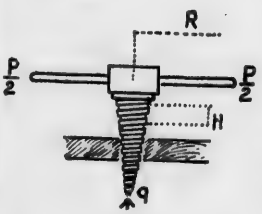
(Voir note page suivante).

(*i*) *Vis.*—Une vis se compose d'un cylindre nommé *noyau* qui porte des filets saillants de forme hélicoïdale.

La vis est à filets triangulaires ou à filets carrés, suivant que le filet est engendré par un triangle ou par un carré.

L'écrou est une pièce creusée d'une rainure, dans laquelle s'engagent exactement les filets saillants de la vis ; c'est, pour ainsi dire, le moule de la vis.

La vis sert généralement à transformer un mouvement circulaire continu en un mouvement rectiligne ; elle permet d'opérer cette transformation avec une grande exactitude, ce qui la fait employer dans plusieurs instruments de précision, comme la machine à diviser.



(Fig. 25.)

Parfois l'écrou est fixe et la vis, en tournant, progresse dans le sens de son axe. Ex. : la presse à copier, l'hélice des bateaux à vapeur, c'est ainsi qu'elle fait avancer—l'eau faisant fonction d'écrou.

La vis peut aussi transformer un mouvement rectiligne en mouvement circulaire, comme dans le foret à vis.

Lorsqu'une vis est en équilibre, la puissance est à la résistance comme le pas de vis est à la longueur de la circonférence qui a pour rayon le levier.

$$\frac{P}{q} = \frac{h}{2\pi R} ; P = \frac{h}{2\pi R} \times q$$

$$Q = \frac{2\pi R}{h} \times P$$

(Voir note page suivante).

18. Ce que l'on gagne en force, on le perd en vitesse. —Influences des résistances dites passives.—Le travail moteur est toujours plus grand que le travail résistant utile.

(*a*) *Ce que l'on gagne en force on le perd en vitesse.*—Si, dans une machine simple sollicitée par une puissance P et une résistance Q, l'égalité travail moteur $Pm =$ Qn travail résistant, montre que le travail moteur équivalent à celui d'une résistance Q le long du chemin n peut être effectué au moyen d'une puissance aussi petite que l'on veut, il suffit de faire agir cette puissance P le long d'un chemin m, tel que l'on ait

$$\frac{P}{Q} = \frac{n}{m}$$

Or il résulte de cette proportion que si la puissance

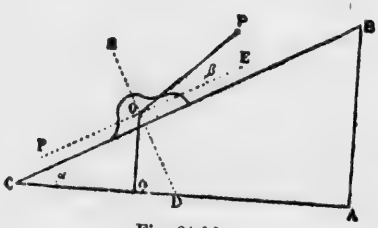


Fig. 24 *bis*

(1) VII. *Plan incliné.*—Soit l l'espace parcouru par le corps le long du plan incliné.

$Tm = l \times P \cos b$ (composante de P dans la direction $O\,E$)

$Tr = l \times Q \cos Q\,O\,F$ (composante de Q dans la direction $O\,F$)

$\cos Q\,O\,F = \sin a$ (triangle rectangle $Q\,O\,O$)

Donc, $l \times P \cos b = l \times Q \sin a$

d'où $\dfrac{P}{Q} = \dfrac{\sin a \text{ d'angle du plan avec l'horizon}}{\cos b \text{ d'angle de la force, avec plan}}$

(2) VI. *Vis.*—Quand la vis fait un tour P tangentielle à la circonférence se déplace et son point d'application fait un tour.

$$Pe = 2\,\pi\,R\,P$$

La vis avance dans l'écrou d'une hauteur $h =$ son pas

$$Qe' = Qh$$

or $Pe = Qe'$; $2\,\pi\,R\,P = Qh$; $\dfrac{P}{Q} = \dfrac{h \text{ du pas}}{2\,\pi\,R \text{ dont } R \text{ est le bras du levier de } P}$

P est 2, 3, 4 fois plus petite que la résistance Q, son chemin devient 2, 3, 4 fois plus grand que n, d'où ce que l'on gagne en force on le perd en chemin parcouru.

(*b*). *Influences des résistances dites passives.*—On nomme résistances passives les résistances qui absorbent une partie du travail sans produire d'effet utile.

Les principales sont :

1o. Le frottement ;

2o. La résistance des milieux. Ex. : l'eau, l'air ;

3o. Les chocs ;

4o. Les vibrations communiquées aux diverses pièces ;

5o. La raideur des cordes ; résistance s'opposant à l'enroulement.

(*c*). *Le travail moteur est toujours plus grand que le travail résistant utile. Le travail moteur* est celui qui produit une force agissant dans le sens du mouvement ; c'est la force *mouvante* ou *puissance.* Elle est encore appelée *force motrice.*

Le *travail résistant* est la force qui agit en sens contraire du mouvement du mobile ; c'est la *force résistante.*

La force résistante se divise en *résistance utile ou principale,* qui n'est autre chose que l'effet que doit produire la machine, son travail est le *travail utile ;* et en *résistance passive* ou *secondaire,* qui n'est autre chose que les frottements, milieux, etc., etc.

Ex. : On élève un seau d'eau au moyen d'un treuil. La force qui agit sur la manivelle produit le travail moteur ; le poids de l'eau élevée, multiplié par la hauteur à laquelle on l'élève, est le travail utile.

Le travail passif sera représenté par le poids du seau, celui de la corde, la résistance que l'eau et l'air offrent au mouvement du seau, la raideur de la corde qu'il faut vaincre pour l'enrouler sur le treuil, le frottement des tourillons, etc., etc.

D'après cela, dans l'équation suivante :

$$T\,m = T\,r$$

il y a trois cas à considérer.

1er Cas $\quad T\,m > T\,r$

C'est la période de *mise en train ;* il faut pour cela que le travail moteur $T\,m$ soit plus grand que le travail résistant Tr.

2e Cas.

$$T\,m = T\,r$$

Dans ce cas la vitesse est uniforme ; c'est la *marche normale* pendant laquelle la machine a sa *vitesse de régime.*

3e Cas.

$$T\,m < T\,r$$

Dans ce cas la vitesse de la machine diminue. C'est la *période d'arrêt,* le travail moteur est plus petit que le travail résistant.

Nous avons vu (18-c) que le travail résistant se compose du *travail utile* et du *travail passif :*

On a donc :

$$T\,r = T\,u + T\,p$$

mais $\quad T\,m = T\,r$

donc $\quad T\,m = T\,u + T\,p$

et une machine sera d'autant plus parfaite que le travail passif est plus faible, le travail utile se trouvant alors une portion plus grande du travail moteur.

Le rapport du travail utile au travail moteur est ce qu'on appelle *rendement d'une machine* ou *coefficient d'effet utile.*

$$\text{Rendement} = \frac{T\,u}{T\,m} = 1 - \frac{T\,p}{T\,m}$$

or il est impossible de rendre nul le rapport du travail passif Tp au travail moteur Tm, c'est-à-dire $\frac{Tp}{Tm}$

d'après cela le rendement est donc toujours plus petit que l'unité et dans les meilleures machines il ne dépasse guère 0.75.

Nous voyons donc d'après ces données qu'il y a lieu de diminuer le plus possible les résistances passives, c'est-à-dire le nombre de pièces en mouvement, d'adoucir les frottements, de bien ajuster les pièces pour éviter le moins de jeu, etc., etc. ; mais malgré tout cela, on ne peut que diminuer les résistances passives sans les supprimer.

En conséquence, une machine, loin de créer du travail, ne rend jamais au travail utile qu'une portion du travail fourni par le moteur : donc le travail moteur est toujours plus grand que le travail résistant utile.

CHAPITRE QUATRIEME.

PESANTEUR.

19. Attraction universelle (Déf. et notion) : Sa loi.

(*a*). *Attraction universelle.*—L'attraction universelle est une force en vertu de laquelle tous les corps de l'univers tendent sans cesse les uns vers les autres.

Cette force agit sur tous les corps, qu'ils soient en repos ou en mouvement. Elle est toujours réciproque entre eux, et s'exerce à toutes les distances, ainsi qu'à travers toutes les substances.

L'attraction universelle prend le nom de *gravitation* lorsqu'elle s'exerce entre les astres ; celui de *pesanteur* quand on considère l'attraction que la terre exerce sur les corps pour les faire tomber.

Les philosophes de l'antiquité avaient adopté l'hypothèse d'une tendance de la matière vers des centres communs sur la terre et sur les astres. Képler admet

une attraction réciproque entre le soleil et les planètes, de même que Bacon, Galilée et Hooke reconnurent une attraction universelle ; mais ce fut Newton qui, le premier, démontra que la gravitation est une loi générale de la nature, et qu'il exprime ainsi :

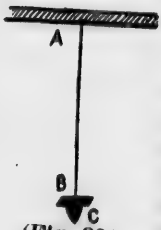
Loi : **Tous les corps s'attirent entre eux en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances.**

20. Pesanteur.—Verticale. (Déf.).—Fil à plomb.

(*a*). *Pesanteur.*—La pesanteur est la force en vertu de laquelle les corps abandonnés à eux-mêmes *tombent*, c'est-à-dire se dirigent vers le centre de la terre.

(*b*). *Direction de la pesanteur-verticale.*—La direction de la pesanteur est celle de la verticale ou perpendiculaire à l'horizon ; c'est la direction du rayon terrestre passant par le lieu.

(*c*). *Fil à plomb.*—Lorsqu'un corps est abandonné à lui-même, il se dirige sensiblement vers le centre de la terre. Pour déterminer cette direction, il suffit de suspendre à un point fixe *A* un fil *A B* qui porte un corps pesant *c*. Ce petit appareil (fig. 26) est connu sous le nom de *fil à plomb*. Quand, après quelques oscillations, le plomb *c* est devenu immobile, le fil indique la direction dans laquelle se trouve le centre de la terre, et donne ce qu'on appelle la *verticale* du lieu de l'observation. Le plan qui est perpendiculaire à cette verticale est le *plan horizontal*, et toute ligne située dans ce plan porte le nom de *ligne horizontale*. Le mot *horizontal* signifie parallèle à l'horizon.



(Fig. 26.)

21. Densité — Poids : absolu, relatif, spécifique (Déf.).

(*a*). *Densité.*—La densité d'un corps est sa masse ou la

quantité de matière qu'il contient sous l'unité de volume, c'est-à-dire le rapport de sa masse à son volume. La densité ne peut être absolue, elle n'est que relative. C'est-à-dire qu'on ne peut assigner la quantité réelle de matière qu'un corps renferme, mais la quantité de matière qu'il contient, à volume égal, par rapport à un autre corps pris pour terme de comparaison. Ce corps est l'eau distillée prise à 4 degrés centigrades au-dessus de zéro, pour les solides et les liquides ; et l'air, pour les gaz.

Ex. : Quand on dit la densité du zinc est 7, cela signifie qu'à volume égal, le zinc contient 7 fois plus de matière que l'eau.

En appelant V le volume d'un corps, M sa masse absolue et D sa quantité de matière sous l'unité de volume, c'est-à-dire sa densité absolue, nous aurons par définition de la densité absolue, l'expression suivante :

$$D = \frac{M}{V} \qquad [1]$$

C'est-à-dire que la densité absolue d'un corps est le rapport de sa masse à son volume.

De l'expression [1] nous tirons pour M

$$M = V\,D \qquad [2]$$

(*b*). *Poids : absolu, relatif, spécifique.*—Le poids absolu d'un corps est la pression qu'il exerce sur l'obstacle qui l'empêche de tomber ; pression qui est due à la résultante des actions de la pesanteur sur chacune des molécules du corps ; plus le corps contient de matière plus la pression est grande, c'est-à-dire que *le poids d'un corps est proportionnel à sa masse.*

Poids relatif.—Le poids relatif se détermine au moyen de la balance ; c'est le rapport du poids absolu du corps à un autre corps pris pour unité.

Poids spécifique.—Le *poids spécifique* ou *densité relative*

d'un corps est le rapport de son poids sous un certain volume, à zéro, à celui d'un égal volume d'eau distillée et à 4° au-dessus zéro. Ex. : Si l'on dit que le poids spécifique du zinc est 7, cela veut dire qu'à volume égal le zinc à zéro pèse 7 fois plus que l'eau distillée prise à 4 degrés.

Les poids des corps, étant proportionnels à leur masse, mais à volume égal, si un corps contient 2, 3 fois plus de matière que l'eau, il doit être 2, 3 fois plus pesant ; par suite, le rapport entre les poids ou le poids spécifique doit être le même que le rapport entre les masses, ou la densité relative ; d'où les expressions *densités relatives* et *poids spécifiques* sont souvent regardées comme équivalentes.

Nous avons vu (10-b) que la masse M d'un corps est égale au rapport constant de la force qui le sollicite à l'accélération de vitesse qu'elle lui imprime $M = \frac{F}{g}$; si donc on représente par P le poids absolu d'un corps, c'est-à-dire la force F qui tend à le faire tomber, et que g représente l'accélération ou intensité de cette force, nous aurons pour la masse du corps

$$M = \frac{P}{g} \text{ d'où } P = M\,G$$

Si, dans la fomule $P = M\,g$, nous remplaçons M par sa valeur $V\,D$ (21, a. formule 2), nous aurons :

$$P = V\,D\,g \qquad [1]$$

Avec un autre corps, dont le poids, le volume et la densité seraient P', V' et D', ou aurait :

$$P' = V'\,D'\,g \qquad [2]$$

et pour $D = D'$ nous aurions, en divisant l'égalité [1]

par l'égalité [2] et supprimant g commun au dénominateur et numérateur.

$$\frac{P}{P'} = \frac{V}{V'} \qquad [3]$$

et pour $P = P'$ on a :

$$V\,D = V'\,D' \text{ d'où } \frac{V}{V'} = \frac{D'}{D} \qquad [4]$$

de l'égalité [3], on conclut *à densité égale les poids sont proportionnels aux volumes* ; et de l'égalité [4] *qu'à poids égal les volumes sont en raison inverse des densités.*

22. Equilibre des corps.— Divers états d'équilibre. (Notions.)

(*a*). *Equilibre des corps.*—On entend par équilibre d'un corps l'état de repos produit sous l'influence des forces dont les effets se neutralisent.

Pour qu'un corps, suspendu librement par un point fixe, soit en équilibre, il faut et il suffit que le centre de gravité et le point de suspension soient sur une même ligne verticale.

Pour un corps reposant sur un seul point d'appui, il faut que le centre de gravité se trouve sur la verticale menée par ce point ; s'il repose sur deux, la verticale passant par le centre de gravité doit rencontrer la droite qui joint les deux points ; s'il repose sur plusieurs, la verticale menée par le centre de gravité doit passer dans l'intérieur de la base, c'est-à-dire du polygone obtenu en joignant les points d'appui.

(*b*). *Divers états d'équilibre.*—Il y a trois états d'équilibre.

1o. *Equilibre stable*, c'est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, y revient de lui-même aussitôt qu'aucun obstacle ne s'y oppose ; état qui est dû à ce

que son centre de gravité est plus bas que dans toute autre position voisine.

2o. *Equilibre instable*, c'est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, ne tend qu'à s'en écarter davantage ; état dû à ce que son centre de gravité est plus haut que dans toute autre position voisine.

3o. *Equilibre indifférent* est celui qui persiste dans toutes les positions que peut prendre un corps ; état dû à ce que le centre de gravité n'est ni relevé, ni abaissé. Ex. : une sphère.

23. Balance.—Enoncé des conditions de précision et de sensibilité.—Méthode des doubles pesées.

(*a*). *Généralités.*—Les masses et les poids peuvent être mesurés à l'aide d'un même instrument de précision, la *balance*, et par une même opération, la *pesée*. On sait en effet qu'il existe, entre la masse M d'un corps et son poids P, la relation générale.

$$P = M g \qquad [1]$$

Comme on connaît la valeur de g, avec une grande approximation, dans les différents lieux du globe, (g égale l'accélération de la pesanteur des lieux observés) il suffira de mesurer directement l'une des grandeurs P et M ; la valeur de l'autre s'en déduira par la formule [1].

Ce sont les poids qu'on a commencé à mesurer directement. On a d'abord choisi une unité de poids, le *gramme*, unité dérivée du mètre qui est lui-même la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre (exactement 10,002,008 mètres. La méthode de mesure a donc consisté à *faire équilibre* au poids inconnu à l'aide d'un poids marqué, c'est-à-dire d'un poids connu, échantillonné d'avance en unités de poids. Connaissant le poids P du corps, on en déduisait sa masse M.

Mais cette unité de poids est elle-même un produit

de deux facteurs dont l'un, la masse M, est constant, et l'autre, l'accélération g, est variable avec la latitude ; il s'ensuit donc que l'unité elle-même est variable avec la latitude. Un gramme de Paris, défini comme le poids d'un centimètre cube d'eau pure (à 4°) à Paris, n'est pas le même poids qu'un gramme de Lima qui serait défini de la même manière. Par conséquent deux pesées faites l'une à Paris et l'autre à Lima, qui conduiraient au même nombre de grammes, ne seraient pas comparables. Inversement, deux pesées qui conduiraient à deux nombres différents pourraient correspondre à deux poids identiques.

Ex. : Une masse d'or qui pèserait 1.000 grammes à Lima (en grammes de Lima) pèserait à Paris 1,002 *gr* 678 (en grammes de Paris). Voyons le calcul à faire :

Soit la formule : $P = M\,g$ dans laquelle

$P =$ le poids que pèserait la masse d'or à Paris sachant que son poids à Lima est égal à 1,000 grammes ;

$M =$ la valeur constante de la masse d'or aussi bien à Lima qu'à Paris ;

$g =$ l'accélération à Paris $= 989.96$.

Nous aurons donc pour Paris :

$$P = M \times 980.96 \text{ d'où } M = \frac{P}{980.96} \qquad [1]$$

Pour Lima la formule sera :

$$P' = M\,g' \quad \text{dans laquelle}$$

$P' =$ le poids de la masse à Lima $= 1.000$ grammes de Lima ;

$M =$ valeur constante de la masse d'or aussi bien à Paris qu'à Lima ;

$g' =$ l'accélération à Lima $= 978.34$.

Nous aurons donc pour Lima, et en remplaçant les lettres par les chiffres,

$$1000 = M \times 978.34, \text{ d'où } M = \frac{1000}{978,34} \quad [2]$$

Les deux égalités [1] et [2] ayant un terme commun M nous pouvons écrire

$$\frac{P}{980,96} = \frac{1000}{978,34}$$

d'où, pour la valeur de P à Paris, nous aurons

$$P = 1000 \times \frac{980,96}{978,34} = 1002 \text{ gr.}, 678 \text{ (gram. de Paris).}$$

Note au sujet de la valeur de la pesanteur et par suite de la différence des poids.—La terre est une sphère légèrement aplatie à ses pôles, c'est-à-dire sphéroïde. On appelle *axe du monde* la ligne idéale autour de laquelle la terre accomplit son mouvement de rotation diurne. On appelle *mouvement diurne*, le mouvement quotidien apparent du ciel autour de la terre, dû au mouvement réel de celle-ci.

On appelle *pôles* les deux points du globe auxquels aboutit cet axe, et *équateur*, le grand cercle de la sphère tracé à égale distance des deux pôles.

L'aplatissement polaire conduit au nombre 1-292, c'est-à-dire que la différence entre le rayon polaire et le rayon équatorial représente la 292ème partie du rayon équatorial.

6,378,395 mètres = Rayon équatorial.
6,356,549 mètres = " polaire.

différence 21,844 × 2492 = 6,378,448 mètres.

Le globe terrestre est divisé en grands cercles passant par les deux pôles, et s'appelant *longitudes* ou *méri-*

diens. Ils sont perpendiculaires à l'équateur. Les petits cercles parallèles à l'équateur, tracés de là jusqu'aux pôles, s'appellent *latitudes* ou *parallèles* et se comptent en partant de l'équateur aux pôles de 0° à 90°. Les circonférences sont divisées en 360 divisions appelées degrés.

La pesanteur est mesurée par la vitesse acquise au bout de la première seconde par un corps qui tombe librement dans le vide. Cette vitesse est à Paris de 9m 8096 et représentée en Angleterre par le nombre 32.2 (pieds anglais et seconde). Comme la terre n'est pas rigoureusement sphérique, cette valeur n'est pas la même partout, la pesanteur est un peu plus forte aux pôles, parce qu'on est plus près du centre ; un peu plus faible à l'équateur pour la raison contraire.

TABLEAU DES CHIFFRES CORRESPONDANT AUX DIVERSES LATITUDES.

aux pôles	(90°)..	..9m.	8316	à	40°..	..9m.	8016
à	80°..	.. "	8306	"	30°..	.. "	7930
"	70°..	.. "	8262	"	20°..	.. "	7861
"	60°..	.. "	8193	"	10°..	.. "	7818
Paris	50°...	.. "	8096	à l'équateur	0°..	.. "	7806

La pesanteur est également mesurée par la longueur du pendule battant la seconde et par le nombre de ses oscillations par jour aux diverses latitudes. A Paris la longueur du pendule battant la seconde est de 994 millimètres ; cette même longueur est de 996mm. aux pôles et de 991mm. à l'équateur. Si l'on prend un pendule qui marque rigoureusement la seconde à l'équateur il exécutera 86,400 oscillations par jour. Ce même pendule, transporté sous une latitude différente, marchera d'autant plus vite qu'on se rapprochera du pôle, et au pôle même ses oscillations s'élèveraient à 86,645 par jour.

TABLEAU DU NOMBRE D'OSCILLATIONS CORRESPONDANT AUX DIVERSES LATITUDES.

au pôle	(90°).... ...	86,645	à	40°...	86,502
à	80°...	" 638	"	30°...	" 461
"	70°...	" 617	"	20°...	" 429
"	60°...	" 584	"	10°...	" 407
Paris	50°...	" 544	l'équateur	0°...	" 400

(*b*). *Balance.*—Les balances sont des instruments qui servent à déterminer le poids des corps.

Pour qu'une balance soit juste, il faut :

1o. Que les bras de fléau soient exactement égaux ;

2o. Que le fléau reste horizontal quand on met des poids égaux quelconques sur les plateaux ;

3o. Que la verticale menée par son centre de gravité passe par le point d'appui, lorsque le fléau est horizontal ;

4o. Que le centre de gravité se trouve un peu au dessous du point d'appui.

Conditions de sensibilité.

1o. Que le fléau soit aussi long et aussi léger que possible ;

2o. Que le centre de gravité soit très près du point d'appui.

Remarque.—Si le centre de gravité était un point d'appui ou de suspension lui-même, des poids égaux tiendraient la balance en équilibre dans toutes les positions, la balance serait *indifférente.*

Si le centre de gravité était au dessus du point d'appui, l'équilibre serait instable et la balance *folle.*

La *balance ordinaire* est un levier du premier genre à bras égaux.

La *balance romaine* est un levier du premier genre à bras inégaux.

La *bascule ordinaire* est une balance pesant au dixième et même au centième, c'est-à-dire que le poids est équilibré par un poids dix fois 100 fois moindre.

Le *Peson*, qui affecte des formes très diverses, se compose d'un levier coudé à angle droit qu'un contrepoids maintient horizontal, lorsque le crochet est vide. Un arc porte les indications que doit fournir l'appareil.

(*c*) *Méthode des doubles pesées ou de Borda.*—Avec une balance qui n'est pas juste, mais qui est sensible, on peut obtenir le poids exact d'un corps au moyen de la méthode des doubles pesées imaginée par Borda.

Pour cela on met le corps à peser dans l'un des plateaux, on en fait la tare en mettant de la grenaille dans l'autre plateau jusqu'à ce que l'aiguille du fléau soit verticale ; on retire le corps et on le remplace par des poids marqués. Lorsque l'équilibre est rétabli, la somme des poids marqués donne le poids du corps et cela quand même la balance ne remplirait ni l'une ni l'autre des conditions de justesse ; car le poids du corps et les poids marqués, agissant successivement sur le même bras de levier, ont fait équilibre à la même tare.

On emploie cette méthode toutes les fois que l'on veut peser avec précision, car aucune balance n'est absolument juste.

24. Lois de la chute des corps. (Enoncé).—Machine d'Atwood. — Les deux formules fondamentales relatives à la chute des corps.

(*a*). *Lois de la chute des corps.*

1ère Loi.—Tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse.

2e Loi.—La vitesse acquise par un corps qui tombe librement dans le vide est proportionnelle au temps pendant lequel il est tombé, ou la durée de sa chute. C'est-à-dire qu'au bout d'un temps 2, 3, 4 fois plus

grand, la vitesse acquise est elle-même 2, 3, 4 fois plus grande : $V = g\,t$.

3e Loi.—Les espaces parcourus par un corps qui, partant de l'état de repos, tombe dans le vide, sont proportionnels aux carrés des temps pendant lesquels ces espaces ont été parcourus. $e = \frac{1}{2}\,gt^2$.

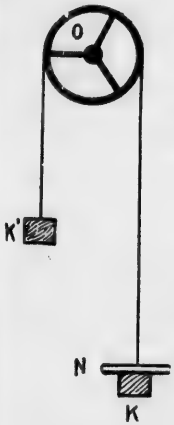
En d'autres termes, dans les temps représentés par 1, 2, 3, 4.... les espaces parcourus le sont respectivement par 1, 4, 9, 16.....

Puisque, d'après cette loi, l'espace parcouru dans la première seconde étant 1, les espaces parcourus dans 2, 3, 4, 5..... secondes sont 4, 9, 16, 25....., il en résulte que l'espace parcouru dans la deuxième seconde est 4 moins 1 ou 3 ; dans la troisième seconde il est 9 moins 4 ou 5 ; dans la quatrième 16, moins 9 ou 7, et ainsi de suite ; c'est-à-dire que les *espaces parcourus* successivement dans la première, la deuxième, la troisième, la quatrième..... seconde, sont entre eux comme la suite naturelle des nombres impairs 1, 3, 5, 7.....

Les lois de la chute des corps ne sont vraies que dans le vide et pour des hauteurs de chute peu considérables. Dans l'air elles sont modifiées par la résistance que rencontrent les corps.

(*b*). *Machine d'Atwood.*—La résistance de l'air croissant avec la vitesse du mobile, pour bien faire il faudrait opérer dans le vide ; cependant on arrive à un résultat satisfaisant en ralentissant le mouvement, de manière à rendre presque nul l'accroissement de la résistance de l'air.

Atwood construisit un appareil, qui porte son nom, auquel il appliqua ce principe. Il se compose (fig. 27) d'une poulie très mobile *O* sur laquelle passe un fil de soie très fin soutenant à ses extrémités deux poids égaux *k* et *k'*. Les poids du fil pouvant être négligés, les deux poids se feront équilibre, en quelque position



(Fig. 27.)

qu'ils se trouvent. Mais si, à l'un d'eux, on ajoute un petit poids n l'équilibre sera rompu et le système se mettra en mouvement, le poids k descendra tandis que le poids k' montera. Or le petit poids n est la seule force agissante ; le mouvement est donc beaucoup plus lent que s'il tombait librement puisqu'il entraîne avec lui les deux autres poids.

Pour apprécier ce ralentissement de mouvement, supposons que le petit poids n tombe d'abord seul, et représentons par m sa masse et par g sa vitesse au bout d'une seconde ; d'où sa quantité de mouvement est mg. Si, maintenant, on place le petit poids n sur le poids k, il ne peut tomber qu'en communiquant une partie de sa vitesse aux deux poids k et k', puisque ceux-ci, se faisant équilibre, la pesanteur est sur eux sans effet. Par conséquent, c'est la même force, qui faisait tomber le petit poids n quand il était seul, qui maintenant va mouvoir ce petit poids n et les deux poids k et k'. La quantité de mouvement sera donc la même. Or si l'on représente par V la vitesse au bout d'une seconde et par m la masse de chacun des poids k et k', la quantité de mouvement est maintenant $(m + 2\ M)\ V$ l'égalant à celle du petit poids n quand il tombait seul, on a :

$$(m \times 2\ M)\ V = g\ m$$

d'où

$$V = \frac{g\ m}{m \times 2\ M} \quad [1]$$

Si l'on suppose que les poids k et k' soient chacun égal à 16, la masse m étant égale à 1, on trouve, en remplaçant dans l'égalité [1], les lettres par leur valeur.

$$V = \frac{g \times 1}{1 \times 2 \times 16} = \frac{g}{33}$$

C'est-à-dire que la vitesse est 33 fois plus petite que si le petit poids n tombait librement dans l'air, ce qui permet de le suivre dans sa chute, et rend la résistance de l'air négligeable.

(c). *Les deux formules fondamentales relatives à la chute des corps.*—Dans le mouvement uniformément accéléré nous avons les deux formules.

$$V = g\,t \quad [1] \quad \text{et} \quad e = \tfrac{1}{2}\,gt^2 \quad [2]$$

dans laquelle g représente l'accélération de vitesse par seconde. Ces formules correspondent à la deuxième [1] et à la troisième loi [2] de la chute des corps.

Remarque.—Si, dans la formule [2], on fait $t = 1$, il vient $e = \frac{1}{2}\,g$ d'où $g = 2\,e$, c'est-à-dire que la *vitesse acquise au bout de l'unité de temps est double de l'espace parcouru dans le même temps.*

Dans la formule [1], la vitesse V est exprimée en fonction du temps t ; mais on peut aussi l'exprimer en fonction de l'espace parcouru, en éliminant t entre les formules [1] et [2]. Pour cela on tire de la première la valeur de t et on élève ensuite les deux membres au carré : nous aurons

$$t = \frac{V}{g} \quad \text{d'où} \quad t^2 = \frac{V^2}{g^2}$$

portant cette valeur de t^2 dans la formule [2] nous aurons :

$$E = \frac{g \times V^2}{2\ g^2} = \frac{V^2}{{}^2g}$$ en supprimant le facteur commun g

d'où nous tirons pour la valeur de V

$$V^2 = 2\,g\,e \quad \text{d'où} \quad V = \sqrt{2\,g\,e}$$

Ce qui montre que lorsqu'un corps tombe dans le vide, *la vitesse acquise en un instant donné est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.*

25. Causes qui modifient l'intensité de la pesanteur. (Notions.)

Il existe trois causes qui font varier l'intensité de la pesanteur :

1o. La distance au centre de la terre ;

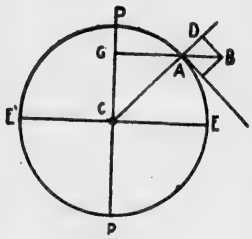
2o. L'aplatissement de la terre aux pôles ;

3o. La force centrifuge.

1ère Cause.—L'attraction terrestre s'exerçant comme si la terre était condensée à son centre, et cette traction agissant en raison inverse du carré de la distance, il en résulte que l'intensité de la pesanteur croît ou décroît quand les corps s'approchent ou s'écartent de la terre.

2e Cause.—L'attraction de la pesanteur varie aussi avec la latitude à cause de l'aplatissement de la terre à ses deux pôles, car vers ces deux points les corps, étant plus rapprochés du centre, sont plus attirés.

3e Cause.—La force centrifuge atteignant son maximum à l'équateur est directement opposée à l'intensité de la pesanteur, tandis qu'en avançant vers les pôles, sa direction devient de plus en plus inclinée par rapport à la pesanteur.



(Fig. 28.)

Soit *P P'* l'axe de rotation de la terre ; *E E'* l'équateur terrestre. En *E* la force centrifuge est dirigée suivant *C E* et agit tout entière pour diminuer l'intensité de la pesanteur ; mais en un point *a*, plus rapproché du pôle, la force centrifuge étant représentée par une droite *a b* perpendiculaire à l'axe *P P'*, tandis que la pesanteur agit suivant *a c*, on voit que la pesanteur n'est pas directement opposée à la force centrifuge, mais seulement à sa composante *a d*, qui est d'autant plus petite par rapport à *a b*, que le point *a* est plus près du pôle.

Remarque.—On prend pour mesure de l'intensité de la pesanteur la vitesse qu'elle imprime, en une seconde, aux corps qui tombent librement dans le vide ; cette vitesse se représente par *g*, elle croît de l'équateur aux pôles ; à Paris elle est de 9m. 8088.

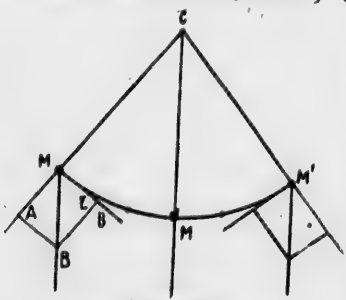
26. Pendule simple et pendule composé. (Déf. et notions).—Lois des oscillations du pendule. (Enoncé).—Longueur du pendule composé.— Indiquer les usages du pendule.

(*a*). *Pendule simple et pendule composé.* — On appelle *pendule* tout corps pesant qui oscille autour d'un point de suspension.

Nous distinguerons deux sortes de pendules : *Le pendule simple* et le *pendule composé.*

Le pendule simple ou pendule idéal mathématique consiste en un point matériel suspendu par un fil inextensible, sans masse et sans poids, à un point fixe autour duquel il pourrait librement osciller. Ce pendule n'existe pas puisque tous les corps sont pesants.

Le pendule composé est tout corps qui peut osciller autour d'un point ou d'un axe fixe ; le point prend le nom de *centre de suspension,* et l'axe fixe ou droite horizontale celui *d'axe de suspension ;* ce pendule consiste en une masse métallique, lenticulaire sphérique, suspendue à une tige mobile autour d'un axe horizontal.



(Fig. 29).

Pour nous rendre compte du mouvement oscillatoire du pendule, considérons le pendule simple *C M* dont *M* soit le point matériel et

C le point de suspension. Menons-le en *C M'* et abandonnons-le à lui-même ; il tendra immdiatement à reprendre la direction verticale. Or la pesanteur *M' b* peut être décomposée en deux forces l'une *M' a*, détruite par la résistance du fil, l'autre *M' e* perpendiculaire à *M' c* et tangente à l'arc *M' M* ; la composante *M' e* sollicite seule le point *M'* à revenir en *M*. En outre elle diminue à mesure que le pendule se rapproche de la verticale, pour être nulle en *M* ; arrivé en ce dernier point, le pendule ne s'arrête pas ; car en vertu de son inertie il est entraîné dans la direction *M M''* ; or il se passe en *M''* ce qui s'est passé en *M'*; le pendule revenant alors de *M''* en *M*, la même série de phénomènes se reproduit, il parcourrait ainsi indéfiniment l'arc *M' M M''* par un mouvement continu de va-et-vient, s'il oscillait dans le vide absolu, et si l'axe de suspension ne donnait lieu à aucun frottement.

On appelle *oscillation* le mouvement d'un pendule suivant l'arc qu'il décrit. *L'amplitude* de l'oscillation est l'arc décrit *M' M M''* ou l'angle *M' C M''* qui lui correspond. La *longueur* du pendule est la distance du point de suspension au point matériel *M*.

(*b*). *Lois des oscillations du pendule.*

1ère Loi.—Pour un même pendule et dans un même lieu, les petites oscillations sont isochrones, c'est-à-dire ont la même durée, tant que leur amplitude ne dépasse pas 2 à 3 degrés.

2e Loi.—Pour des pendules de même longueur, la durée des oscillations est la même, quelle que soit la substance dont le pendule est formé.

3e Loi.—Pour des pendules inégaux, la durée des oscillations est proportionnelle à la racine carrée de la longueur.

4e Loi.—Sous des latitudes différentes, on à des altitudes inégales, la durée des oscillations, pour des pen-

dules [illegible] longueur, est en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de la pesanteur.

Ces lois découlent de la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

qui donne la durée des oscillations pour une amplitude d'excursion assez petite.

Dans cette formule :

t = la durée d'une oscillation ;

l = la longueur du pendule ;

g = l'intensité de la pesanteur à Paris 9m. 8088 ;

π = le rapport du diamètre à la circonférence 3,1416.

Pour la troisième loi, soit deux pendules de longueur l et l' et de durée d'oscillation t et t'. nous aurons

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{et} \quad t' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g}}$$

On peut aussi les écrire

$$t = \pi \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g}} \quad \text{et} \quad t' = \pi \frac{\sqrt{l'}}{\sqrt{g'}}$$

en divisant ces deux dernières égalités membre à membre et supprimant les facteurs communs π et $\sqrt{g}$, on a

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}$$

de même pour la 4e loi, soit g g' l'intensité de la pesanteur en deux lieux différents, et t et t' les durées des oscillations d'un même pendule, en ces deux lieux nous aurons

$$t = \pi \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g}} \quad t' = \pi \frac{\sqrt{l}}{g'}$$

d'où, en divisant membre à membre, nous avons

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}$$

et si nous élevons au carré les deux membres de cette égalité, nous aurons

$$\frac{g'}{g} = \frac{t^2}{t'^2}$$

Ce qui veut dire que *pour un même pendule, dans deux lieux différents, l'intensité de la pesanteur est en raison inverse du carré de la durée des oscillations.*

(*c*). *Longueur du pendule composé.*—Dans un pendule composé, ce n'est pas la longueur proprement dite qu'il faut considérer, mais bien la *longueur d'oscillation*, c'est-à-dire la longueur du pendule simple qui ferait ses oscillations dans le même temps. En effet, par suite de la 3e loi, le mouvement des points les plus rapprochés de l'axe de suspension se trouve retardé, c'est-à-dire oscille moins rapidement que s'il était libre, tandis que le mouvement des points les plus éloignés est accéléré. Entre ces positions extrêmes, il y a des points qui ne sont ni accélérés ni retardés et c'est l'ensemble de ces points qui constitue l'axe ou centre d'oscillation ; c'est cette distance de l'axe de suspension à l'axe d'oscillation qu'on nomme longueur du pendule composé.

(*d*). *Usage du pendule.*—Le pendule a servi à déterminer l'intensité de la pesanteur. L'isochronisme de ses oscillations l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges.

Pour mesurer l'intensité de la pesanteur, on résout l'équation $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ en élevant les deux membres au carré on a :

$$t^2 = \pi^2 \frac{l}{g} \quad \text{d'où} \quad g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$$

CHAPITRE CINQUIEME.

LIQUIDES.

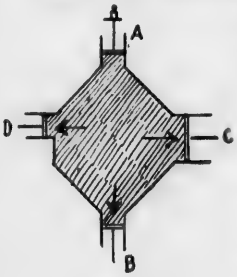
27. Caractères généraux des liquides.

Les liquides sont des corps ayant une très faible cohésion, n'affectant aucune forme stable et prenant la forme des vases dans lesquels on les verse. Leur fluidité n'est pas parfaite, très grande dans l'éther et l'alcool, très faible dans l'acide sulfurique et les huiles grasses. Ils ne sont doués que d'une compressibilité et élasticité à peine sensible.

28. Principe d'égalité de pression. (Notions).

Ce principe ou *principe de Pascal* s'énonce ainsi: Toute pression, exercée sur un point quelconque de la masse d'un liquide, se transmet dans tous les sens avec la même intensité et à surface égale à celle qui reçoit la pression, et si la surface qui reçoit l'intensité avait une surface double ou triple de celle qui reçoit la pression, il faudrait un effort double ou triple pour conserver l'équilibre.

Ex. : soit (fig. 30) le polyèdre *A B C D ;* si en *A* je fais une pression de quatre livres en *B* et en *D*, il faudra un effort de 4 livres pour maintenir les pistons en place, et en *C* il me faudra un effort double parce que ce piston est double des autres.



(Fig. 30.)

Dans les pressions transmises par les liquides aux parois des vases, il importe d'observer que ces pressions devront toujours être supposées perpendiculaires à ces parois, et, en effet, toute pression oblique se décomposant en deux autres, l'une perpendiculaire à la paroi, et l'autre dirigée dans son

plan, cette dernière étant sans effet sur la paroi, c'est donc seulement la pression perpendiculaire qu'on a à observer.

29. Pressions développées dans les liquides par la pesanteur. 1o. Pression de haut en bas ; ses lois.— 2o. Pression de bas en haut ou poussée.

(*a*). *Pression de haut en bas ; ses lois.*—Si l'on conçoit le liquide divisé en tranches horizontales d'égale épaisseur et de même poids, la seconde tranche supporte une pression égale au poids de la première, la troisième tranche une pression égale au poids des deux premières, c'est-à-dire double, et ainsi de suite ; d'où l'on conclut que la pesanteur fait naître dans les liquides des pressions intérieures soumises aux lois suivantes :

1ère Loi.—Pour un même liquide, la pression, en un point quelconque de la masse, est proportionnelle à la profondeur.

2e Loi.—La pression est la même sur tous les points d'une même tranche horizontale. (Car toutes sont à la même profondeur).

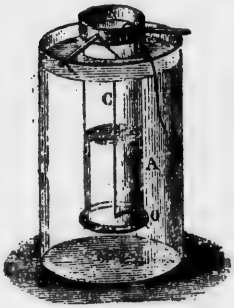
3e Loi.—Pour une même profondeur, dans des liquides différents, la pression est proportionnelle à la densité du liquide.

Plus loin nous verrons que la pression exercée par un liquide est indépendante de la forme du vase, de la quantité de liquide, mais qu'elle dépend de la profondeur.

(*b*). *Pression de bas en haut ou poussée.*—La pression exercée par les tranches supérieures, d'un liquide, sur les tranches inférieures, fait naître de bas en haut une réaction égale et contraire, pression que l'on appelle *poussée des liquides.*

Pour le démontrer, on se sert (fig. 31) d'un tube *K* ouvert à deux extrémités, à l'extrémité inférieure duquel on applique un disque *O* servant d'obturateur ; puis

maintenant ce disque à l'aide d'un fil, on plonge le tube verticalement dans le vase *A B* plein d'eau. Le liquide appliquera de lui-même l'obturateur contre les bords du tube et il restera en place tant que l'eau versée dans l'intérieur du tube n'aura pas atteint le niveau *C D* de l'eau du vase, alors l'obturateur *O* tombera; ce qui démontre que la pression de bas en haut ou poussée, qui s'exerçait sur l'obturateur, est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section intérieure du tube *K* et pour hauteur la distance verticale de l'obturateur à la surface du liquide dans lequel plonge le tube.



(Fig. 31).

30. La pression sur le fond des vases est indépendante de leurs formes (Dém.).

La pression sur le fond d'un vase est indépendante de la forme de ce vase et de la quantité absolue du liquide, ce qui peut s'énoncer ainsi :

La pression exercée par un liquide sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne cylindrique de ce liquide multiplié par sa densité et ayant pour base le fond du vase et pour hauteur sa distance au niveau.

On le démontre expérimentalement au moyen de l'appareil de Haldat et de celui de Masson qui prouvent qu'avec une très petite quantité de liquide on peut produire des pressions considérables.

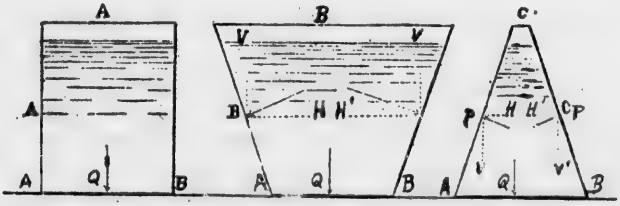
31. Pression sur les parois latérales, centre de pression.

Les pressions latérales, que les liquides exercent sur les parois des vases qui les contiennent, sont une consé-

quence du principe de l'égalité de pression ou principe de Pascal (28). Elles agissent perpendiculairement à ces parois et avec une intensité d'autant plus grande que leur application est plus éloignée du niveau du liquide. Ce qui fait voir que *la pression exercée par un liquide sur une portion plane de la paroi latérale d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base cette portion de paroi ; et pour hauteur la distance de son centre de gravité au niveau du liquide.*

Le point d'application de la résultante des pressions partielles, sur les différents points de la paroi considérée, se nomme *centre de pression.* Il est toujours situé un peu au-dessous du centre de gravité, les pressions élémentaires qui forment la pression totale allant en augmentant avec la profondeur.

32. Paradoxe hydrostatique. (Notions.) — La pression, exercée sur le fond d'un vase plein de liquide, ne dépendant ni de la forme ni de la quantité de liquide (30), mais seulement de la hauteur de liquide au-dessus du fond, il ne faut donc pas confondre cette pression



(Fig. 32) (Fig. 33) (Fig. 34)

exercée sur le fond, avec celle que le vase lui-même exerce sur le corps qui lui sert de support, cette dernière étant toujours égale au poids total du vase et du liquide qu'il contient, c'est cette distinction entre la pression produite sur le fond du vase et celle produite sur la ba-

lance que l'on appelle *paradoxe hydrostatique*. Ex. : soit trois vases *A B C* (fig. 32, 33, 34) de même fond, mais de capacités différentes et remplis d'eau à la même hauteur. La pression sur le fond des vases est la même dans les trois, elle est égale à une colonne d'eau qui aurait pour hauteur *b c* et pour base la base commune *a b* ; mais la pression transmise par les vases au support qui les soutient est inégale. En effet, si, dans le vase *B*, on décompose les pressions normales aux parois *P P'* en pressions horizontales *H H'*, et en pressions verticales *V V'* les pressions *H H'* se détruisent deux à deux comme opposés ; tandis que les pressions verticales *V V'* s'ajoutant à celles qui s'exercent sur le fond, c'est la somme de toutes ces pressions qui s'exercent sur le support.

Il est donc plus pressé qu'il ne le serait par le vase *A*, quoique la pression sur le fond soit la même dans les deux cas. Au contraire, dans le vase *C* (fig. 34), les pressions verticales *V V'* étant dirigées en sens contraire des pressions sur le fond *Q*, ce n'est que la différence de ces pressions qui se transmet au support du vase ; d'où ce support est moins pressé que le vase *A*.

C'est cette contradiction que l'on appelle Paradoxe hydrostatique.

38. Conditions d'équilibre : 1° d'un liquide dans un seul vase ; 2° d'un seul liquide dans plusieurs vases communiquants ; 3° de plusieurs liquides superposés dans un seul vase ; 4° de plusieurs liquides hétérogènes dans deux vases communiquants. (Enoncé).

1°. Equilibre d'un liquide dans un seul vase.—Deux conditions :

(*a*). Pour qu'un liquide demeure en équilibre, il faut que sa surface libre en chaque point soit perpendiculaire à la direction de la pesanteur.

(*b*). Une molécule quelconque, prise dans la masse, doit éprouver, en tous sens, des pressions égales et contraires.

2°. Equilibre d'un seul liquide dans plusieurs vases communiquants. Dans ce cas il y a équilibre quand le liquide satisfait aux deux conditions précédentes et, de plus, que les diverses surfaces libres du liquide, dans tous les vases, soient situées dans un même plan horizontal; application : niveau d'eau, puits artésiens.

3°. Equilibre de plusieurs liquides superposés dans un seul vase.—Plusieurs liquides ne pouvant se mélanger sont surperposés dans un même vase, et pour que l'équilibre soit stable ils devront être superposés par ordre de densité croissante de haut en bas. Ex. : la fiole des quatre éléments (mercure, eau carbonatée, alcool et huile de naphte.)

4°. Equilibre de plusieurs liquides hétérogènes dans deux vases communiquants.—Deux liquides, de densités différentes et sans action chimique l'un sur l'autre, contenus dans deux vases communiquants et qui se font équilibre, doivent avoir les hauteurs de leurs colonnes liquides en raison inverse de leur densité.

Ce que l'on représente par l'expression suivante :

$$\frac{h}{h'} = \frac{d'}{d} \quad \text{d'où} \quad h\,d = h'\,d'$$

34. Presse hydraulique — On désigne sous ce nom un appareil qui sert à soumettre à une forte pression des objets de différente nature, ou encore à produire des tractions puissantes.

Cette presse se compose essentiellement de deux corps de pompe de diamètres inégaux, communiquant ensemble par un tuyau horizontal et muni chacun d'un piston plongeur P et p. Le petit piston p est mis en mouvement par un levier; alors en vertu du principe de Pascal, ou d'égalité de pression (28), voici ce qui se passe : Supposons que la base du grand piston soit deux cents fois plus grande que celle du petit piston, les pressions étant

proportionnelles aux surfaces, un effort de 1 kilo exercé sur le petit piston p fera équilibre à un effort de 200 kilos exercé sur le grand piston P. Si, en outre, le bras de levier de la force motrice est cinq fois plus long que celui de la résistance, la pression produite par la tablette du grand piston P sera de $200 \times 5 = 1000$ kilos. On conçoit d'après cela quelle énorme pression peut être produite par le seul bras d'un homme.

Afin d'empêcher l'eau de se perdre entre le piston P et la paroi du corps de pompe, on a placé une pièce nommée *cuir embouté*, c'est un cuir épais, imbibé d'huile et imperméable à l'eau ; ce cuir est recourbé en forme d'un ∩ renversé, il touche par son bord intérieur au piston et par son bord extérieur à la paroi du corps de pompe, de sorte que plus l'eau est comprimée dans ce cuir, plus elle s'applique d'un côté sur la paroi du corps de pompe, et de l'autre sur le piston, de manière à empêcher toute fuite.

35. Niveau d'eau et niveau à bulle d'air.

(*a*). *Niveau d'eau.*—Le niveau d'eau est une application des conditions d'équilibre dans les vases communiquants. Il se compose d'un tube métallique d'une longueur d'environ un mètre, et terminé par deux coudes auxquels sont fixés deux tubes ou fioles de verre : pour s'en servir on le remplit d'eau et on le dresse sur un trépied mobile. Le liquide s'arrêtant à la même hauteur dans les deux fioles, la ligne de visée, qui passe par les deux surfaces libres, est horizontale. Il faut éviter d'employer des tubes étroits, car l'eau mouillant le verre s'élèverait le long de leurs parois d'une manière trop sensible et alors la visée serait incertaine ; cet instrument sert à prendre des nivellements.

(*b*). *Niveau à bulle d'air.*—Ce niveau est plus sensible que le premier. C'est un tube de verre un peu convexe à sa partie supérieure et contenant de l'alcool coloré

au rouge et une bulle d'air, qui tend toujours à occuper la partie la plus élevée. Ce tube est soudé à la lampe et renfermé dans un étui de cuivre qui lui-même repose sur une plaque de même métal.

Pour reconnaître l'horizontalité d'une droite, on l'applique sur cette droite et la bulle d'air doit se porter au point le plus élevé et s'y loger exactement, quand l'horizontalité est parfaite.

36. Pressions supportées par un corps plongé dans un liquide, principe d'Archimède (Notions).

Quand un corps est plongé dans un liquide, il est pressé de toutes parts ; mais parmi les molécules qui agissent sur lui, les unes exercent des pressions horizontales qui se détruisent mutuellement, comme étant égales et de sens contraires ; les autres exercent des pressions contraires et inégales dont la résultante, c'est-à-dire la différence est représentée par le poids d'un volume de liquide égal à celui du corps. Et, en effet, soit un cube *A B* plongé dans l'eau, si nous considérons les pressions qui s'exercent sur les surfaces *A* et *B*, nous voyons, pour la surface *A*, qu'elle est pressée de haut en bas et que cette pression est égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la surface *A* et pour hauteur *A D* ; il en est de même pour la face inférieure qui est poussée de bas en haut, cette poussée est égale au poids d'une colonne qui aurait pour base cette face *B* et pour hauteur *B D* ; le cube tendra donc à être soulevé par la différence de ces deux pressions, c'est-à-dire

(Fig. 35.)

$$B\,D - A\,D = A\,B$$

A B est une pression évidemment égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait même base et même hauteur que le cube ; cette pression équivaut donc au poids même du volume d'eau déplacée par le corps immergé.

C'est à cette force qui tend à soulever les corps plongés que l'on donne le nom de *force de poussée* ou simplement de *poussée du liquide.*

Principe d'Archimède.—D'après ce que nous venons de dire de la poussée du liquide, tout corps plongé dans un liquide est soumis à l'action de deux forces opposées : la pesanteur qui tend à le faire abaisser et la poussée du liquide qui tend à le soulever avec un effort égal au poids même du liquide que le corps déplace ; le poids de ce corps est donc détruit en totalité ou en partie par cette poussée. On énonce ce principe dans les termes suivants : *Tout corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du volume du liquide déplacé.* Ce principe, qu'on appelle *Principe d'Archimède,* fut découvert par ce dernier. On peut le vérifier au moyen de la balance hydrostatique.

37. Equilibre des corps immergés et des corps flottants.

Un corps plongé dans un liquide de même densité que lui, la poussée qu'il reçoit est égale à son poids, il reste donc en suspension dans le sein du liquide.

Si le corps est plus dense il tombe, son poids l'emportant sur la poussée.

Enfin, le corps étant plus léger, la poussée l'emporte et il immerge.

Pour qu'un corps plongé dans un liquide ou flottant à sa surface soit en équilibre, il faut deux conditions :

1o. Le corps doit déplacer un poids de liquide égal au sien ;

2o. Son centre de gravité et le centre de pression du liquide déplacé doivent être sur une même verticale.

Pour que l'équilibre soit stable, il faut que le centre

de gravité soit au-dessous du centre de poussée ; dans le cas contraire le corps flottant est sujet à chavirer à la moindre secousse. C'est pour cette raison que l'on a soin de lester les navires qui n'ont pas une charge suffisante.

38. Détermination des poids spécifiques des solides et des liquides, 1° par la méthode de la balance hydrostatique ; 2° par la méthode du flacon.

Le poids spécifique ou densité d'un corps est le rapport du poids d'un volume quelconque de ce corps, supposé à zéro, au poids d'un égal volume d'eau distillée, celle-ci étant à 4 degrés au-dessus de zéro, c'est-à-dire son maximum de densité.

Le terme de comparaison est, pour les solides et les liquides, l'eau distillée, prise à 4 degrés centigrades au-dessus de zéro ; c'est à l'air pris pour unité que l'on rapporte les poids spécifiques des gaz.

D'après la définition du poids spécifique, si l'on représente par P le poids d'un corps dont le volume est V à zéro, par p le poids à 4 degrés d'un égal volume d'eau distillée, et par D le poids spécifique du corps, on a, par définition,

$$D = \frac{P}{p}$$

Mais nous avons toujours $p = V$ puisque 1 cent. cube et 1 déci. cube d'eau distillée pèsent 1 gramme et 1 kilogramme, et l'on aura toujours numériquement $p = V$ si l'on a soin de compter en grammes ou en kilogrammes, suivant que le volume l'est en centimètres ou en décimètres cubes : la formule :

$$D = \frac{P}{p}$$ deviendra, en remplaçant p par V :

$$D = \frac{P}{V}$$ ce qui permet de dire que le poids spécifique d'un corps est le rapport de son poids à son volume.

(a) *Poids spécifique des solides.—1o. Par la méthode de la balance hydrostatique.*—Cette balance, due à Galilée, ne diffère de la balance ordinaire que par un petit crochet fixé au-dessous de chacun des plateaux, et par une crémaillère qui permet, au moyen d'un pignon denté, d'élever ou d'abaisser le support du fléau ; pour opérer on suspend le corps à l'aide d'un fil très fin ; au-dessous de l'un des plateaux de la balance, on établit l'équilibre avec des poids, puis on abaisse la balance de manière que le corps vienne plonger dans l'eau distillée et on établit de nouveau l'équilibre. La différence entre les deux pesées représente le poids du volume d'eau déplacée, d'où l'application de la formule $D = \frac{P}{V}$, V représentant le volume d'eau déplacée, c'est-à-dire la différence entre les deux pesées. Ex. :

Un morceau de porcelaine pèse dans l'air 53 *g.* 75, et dans l'eau 28 *g.* 75, le poids de l'eau déplacée ou son volume sera 53.75—28.75=25 grammes ou 25 centimètres cubes ; alors nous aurons, d'après notre formule,

$$D = \frac{53.75,}{53.75 - 28.75} = \frac{53.75}{25} = 2.15$$

la densité cherchée sera donc 2.15.

2o. Solides ; par la méthode du flacon.—Le flacon dont on fait usage est petit et à large goulot (fig. 36) fermé par un bouchon de verre ; ce bouchon est foré d'un trou qui se prolonge par un tube capillaire terminé par un tube à grand diamètre ; sous le tube capillaire existe un point de repère *a*, et à chaque pesée on a soin de remplir d'eau le flacon exactement jusqu'à ce point ; pour le remplir on plonge en entier le flacon dans l'eau et on le bouche pendant qu'il est immergé ; le flacon et la tubulure étant complètement remplis, on enlève l'excès d'eau jusqu'au point *a* avec du papier Joseph (papier à filtres). Ceci fait, on pèse avec le plus grand soin le

(Fig. 36).

corps dont on cherche la densité, soit p le poids obtenu. On place ensuite le flacon à côté du corps sur le plateau de la balance et on pèse à nouveau soit p' le poids du corps et du flacon réunis. On retire le flacon et l'on y introduit le corps, qui chasse un volume d'eau égal à son propre volume. On fait alors une troisième pesée du flacon, soit p'' qui, retranché de p', donnera le poids du liquide expulsé, c'est-à-dire le volume ; le poids spécifique du corps sera donc :

$$D = \frac{P}{p' - p''} = \frac{P}{V}$$

En appelant P le poids du corps, p le poids du flacon rempli d'eau, p' le poids du flacon après l'introduction du corps, on aurait pour formule

$$D = \frac{P}{p + P - p'} \quad [1]$$

Ex. : soit la densité du laiton à chercher, sachant que le morceau sur lequel on opère pèse 31 gr., 68, que le flacon rempli d'eau pèse 325 grammes et qu'après l'immersion du métal, il pèse 347 gr. 68, la formule [1] nous donnera

$$D = \frac{31.68}{325 + 31,68 - 347,68} = 3.52$$

La densité du laiton sera donc = 3.52.

(*b*). *Poids spécifiques des liquides.—1o. Par la méthode de la balance hydrostatique.* On suspend au-dessous du plateau de la balance un corps qui ne soit pas attaqué par le liquide dont on veut connaître la densité, puis on lui fait équilibre avec une tare ; on le plonge successivement dans le liquide et l'eau distillée, les poids p et p' qu'il faudra ajouter pour rétablir l'équilibre représenteront les poids du liquide et de l'eau à volume égal et

le poids spécifique cherché sera donc égal au rapport de p à p' c'est-à-dire

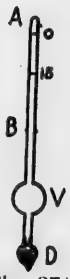
$$D = \frac{p}{p'} = \frac{p}{V} \quad \text{d'où} \quad D = \frac{p}{V}$$

2o. Liquides ; par la méthode du flacon.—On pèse successivement un flacon vide p plein d'eau p' et plein de liquide p'' dont on désire connaître le poids spécifique. Les trois poids obtenus, p p' p'' donnent, par différence de $p'-p$, le poids du volume d'eau, et de $p''-p$ le poids du volume du liquide, à volumes égaux tous les deux. Le poids spécifique du liquide sera donc égal au rapport.

$$D = \frac{p'' - p}{p' - p} = \frac{P}{V}$$

39. Aréomètre de Baumé.— L'aréomètre de Baumé est un instrument à poids constant mais à volume variable, c'est-à-dire qu'il n'a pas de point d'affleurement fixe et conserve toujours le même poids; cet instrument n'est pas destiné à mesurer les poids spécifiques, mais à faire connaître le degré de concentration des dissolutions salines, des acides, des sirops, des liqueurs alcooliques, d'où les noms de pèse-sels, pèse-sirops, pèse-liqueurs, pèse-acides, etc., etc.

L'aréomètre de Baumé est un flotteur de verre, formé d'une tige A B à laquelle est soudée une boule remplie d'air V, et à celle-ci une boule plus petite, D, pleine de mercure, qui sert de lest. La graduation varie suivant qu'ils doivent être employés pour les liquides plus denses ou moins denses que l'eau.



(Fig. 37.)

1°. Liquides plus denses que l'eau. — Dans ce cas, on leste l'aréomètre de manière qu'il enfonce dans l'eau distillée jusqu'en haut de la tige au point A; par exemple, on marque un petit trait au point d'affleurement, ce sera le zéro de l'échelle. On marque ensuite 15 au point d'affleu-

rement obtenu dans une dissolution formée de 85 parties d'eau sur 15 parties en poids de sel marin. On divise l'intervalle en 15 parties égales et l'on continue la division au-dessous ; ces divisions sont les degrés de l'instrument. Ce genre d'aéromètre est le pèse-sels.

2o. Liquides plus légers que l'eau.—Pour les liquides plus légers que l'eau, le zéro doit se trouver au-dessus de la tige, la graduation est donc changée. Baumé a pris pour zéro le point d'affleurement dans une dissolution de 90 parties d'eau sur 10 parties de sel marin.

Fig. 58

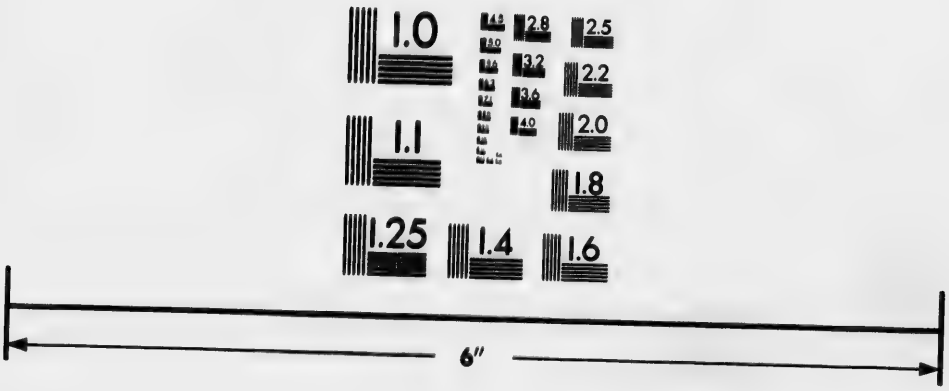
On plonge ensuite l'instrument dans l'eau distillée et l'on marque 10 au point d'affleurement. On divise la distance des deux points obtenus en dix parties égales et l'on poursuit la division au-dessus. Ce genre d'aréomètre est le *pèse-liqueurs.*

Ces instruments sont gradués à la température de 12°, 5 centigrades. La solution de sel marin, à 15 parties de sel pour 85 parties d'eau distillée, a un poids spécifique de 1,116 ; la solution, à 10 parties de sel marin pour 90 parties d'eau, un poids spécifique de 1,0847.

Ces deux aréomètres sont gradués d'une manière tout à fait arbitraire, et n'indiquent ni les densités des liquides, ni les quantités de sel dissous. Cependant on les emploie avec avantage pour reconnaître si une solution saline ou acide a été portée à un point de concentration déterminé. Ex. : On sait que le pèse-acide doit marquer :

66 dans l'acide sulfurique concentré.
56 " " nitrogène du commerce.
22 " " chlorhydrique ordinaire.
3 " l'eau de mer (à la température de 22° c.)
35 à froid dans un sirop bien fait.
36 dans l'éther ordinaire du commerce.
65 " " " rectifié

IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (MT-3)



Photographic
Sciences
Corporation

23 WEST MAIN STREET
WEBSTER, N.Y. 14580
(716) 872-4503

2.8
3.2
3.6
2.5
2.2
2.0
1.8
1.6
1.1
1.0

de 22 à 25 dans l'ammoniaque du commerce plus ou moins concentré.

40. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — L'alcoomètre de Gay-Lussac donne, en centième de volume, la proportion d'alcool qui se trouve dans une liqueur, cet appareil a été gradué à 15° c.

(Fig. 39)

La forme de cet instrument (fig. 39) est la même que celle de l'aréomètre ; on le leste de manière que, dans l'alcool absolu, il s'enfonce jusqu'au sommet de la tige où l'on marque 100 ; puis dans une éprouvette à pied graduée en 100 parties égales, on verse 95 parties d'alcool absolu et on achève de la remplir jusqu'a 100 avec de l'eau distillée ; on y plonge l'instrument et, au point d'affleurement, on marque 95. On vide l'éprouvette, on y verse 90 parties d'alcool absolu et on achève de remplir jusqu'à 100 avec l'eau distillée ; on y plonge l'instrument et, au point d'affleurement, on marque 90 et ainsi de suite de 5 en 5, divisant enfin les intervalles de 5 en 5 en cinq parties égales, l'instrument est gradué.

L'alcoomètre étant gradué à 15 degrés, ce n'est qu'à cette température que ses indications sont précises. Si l'on opère à des températures soit plus hautes soit plus basses, les liquides se dilatent ou se contractent, l'alcoomètre s'enfonce plus ou moins, de là des causes d'erreur ; pour les supprimer, Gay-Lussac a construit des tables de corrections.

Ex. de l'emploi de l'alcoomètre : Si, à la température de 15°, l'alcoomètre s'enfonce dans une eau-de-vie jusqu'à la division 45, cela veut dire que cette eau-de-vie contient 45 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau.

L'emploi de l'alcoomètre n'est réellement applicable qu'aux mélanges d'alcool et d'eau. Si ces mélanges contiennent du sucre ou des sels, leur densité augmente et les indications deviennent fautives ; il faut avoir re-

cours à la distillation du liquide dont on pèse le produit de la distillation.

41. Phénomènes Capillaires (Indiquer les principaux)—Quand on plonge dans l'eau l'extrémité d'un tube de verre *capillaire*, c'est-à-dire d'un petit diamètre, on voit le liquide monter dans le tube, au-dessus de son niveau, et se terminer par une surface concave. Si on plonge le même tube dans du mercure, il se produit un phénomène inverse, la colonne se termine par une surface convexe.

Il y a ascension quand le liquide est de nature à mouiller le tube et dépression dans le cas contraire.

Ces surfaces courbes sont désignées sous le nom de *ménisques*, de tous les liquides purs c'est l'eau qui s'élève le plus.

Les phénomènes capillaires s'observent dans beaucoup de cas.

Ex. : L'imbibition rapide d'un morceau de sucre ; c'est en vertu de la capillarité que l'eau monte de la partie la plus basse d'un monceau de sable jusqu'à son sommet ; qu'elle s'introduit entre les fibres du bois sec, qui se gonfle au point de rompre les pierres les plus dures dans lesquelles on l'engage en forme de coin ; les mèches ordinaires de lampe, de chandelle qui sont des faisceaux de fibres textiles juxtaposées, entre lesquelles l'huile, le suif montent comme entre de petites lames ou de petits tubes.

CHAPITRE SIXIEME.

GAZ.

42. Caractères physiques des gaz.—Expérience qui démontre leur force expansive.

(*a*) *Caractères physiques des gaz.*—Les gaz ont pour caractère spécial, par rapport aux autres corps, de tendre constamment à occuper un plus grand espace.

Leurs propriétés caractéristiques sont : *la fluidité, la*

pesanteur, l'élasticité, la compressibilité, l'expansibilité.

Quand les gaz sont enfermés dans un vase, ils prennent entièrement la forme de ce vase, et exercent une pression constante sur ses parois ; cette pression constitue leur *tension* ou *force élastique.*

(*b*). *Expérience qui démontre leur force expansive.* — Cette force expansive est constatée par l'expérience suivante : On met sous le récipient d'une machine pneumatique une vessie fermée et contenant une petite quantité d'air. A mesure qu'on fait le vide, la vessie se gonfle ; et elle revient à son volume primitif, dès le moment où on laisse rentrer l'air dans le récipient, c'est-à-dire où l'on rétablit la pression qui s'exerçait sur la surface extérieure de la vessie.

43. Poids des gaz. (Comment on le constate). — Pour constater le poids d'un gaz, on suspend, au fléau d'une balance, un ballon de verre de 3 à 4 litres qu'on pèse plein d'air ; et après y avoir fait le vide on le pèse de nouveau, et l'on trouve que la seconde pesée est plus faible, ce qui fait connaître le poids de l'air.

On trouve par ce procédé que le poids d'un litre d'air à zéro et sous la pression atmosphérique 760 mm. pèse 1 g. 293.

En divisant le poids du litre d'air 1.293 par le poids d'un litre d'eau 1000 gr., on a pour quotient le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, quotient qui est égal à 0,001293 ; ce nombre est 773 fois plus petit que l'unité, poids spécifique de l'eau, donc, à volume égal, l'eau pèse 773 fois plus que l'air.

Les gaz transmettent les pressions suivant les mêmes lois que les liquides et sont soumis au principe de Pascal, c'est-à-dire qu'ils transmettent les pressions en tous sens, avec la même intensité, sur les parois des vases qui les contiennent : donc toute pression exercée sur un point quelconque de la masse d'un gaz se transmet également dans tous les sens.

44. Pression et hauteur de l'atmosphère. — On donne le nom d'atmosphère (*atmos*, vapeur, et *sphaira*, sphère) à la couche d'air qui enveloppe le globe terrestre : On évalue sa hauteur depuis 70 kilomètres à 340 kilomètres ; au delà serait un vide absolu.

Ex. de pression : Crève-vessie ; hémisphère de Magdebourg.

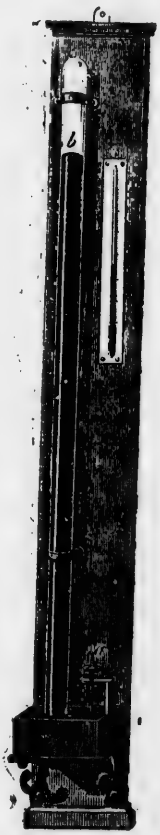
45. Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes ou en livres. Expérience de Toricelli.

Toricelli constata que dans un tube de verre, long de 80 centimètres et d'un diamètre intérieur de 6 à 7 millimètres, rempli de mercure et retourné sur la cuve à mercure, la colonne de mercure s'abaisse aussitôt de plusieurs centimètres et conserve une hauteur qui, au niveau des mers, est de 76 centimètres ou 760 millimètres. Il est évident que le poids de la colonne mercurielle fait équilibre au poids d'une colonne d'air de même diamètre et d'une hauteur égale à celle de l'atmosphère. Supposons que le tube ait une section intérieure d'un centimètre carré, la colonne de mercure, qui est dans le tube, ayant alors la forme d'un cylindre d'un centimètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur, son volume est de 76 centimètres cubes. Or, 1 cent. cube d'eau pesant 1 gramme, 1 cent. cube de mercure doit peser 13 g. 6, puisque ce liquide pèse 13.6 fois plus que l'eau ; d'où le poids de la colonne de mercure dans le tube équivaut à 13 g. 6 × 76 = 1033 grammes égal 1 k. et 33 grammes ; telle est la pression sur 1 cent. carré, sur 100 cent. carrés elle sera 1.033 × 100 = 103 k. 3, et sur un mètre carré qui renferme 100 cent. carrés elle sera de 103 k. 3 × 100 = 10,330 kilogrammes.

La surface totale du corps humain étant en moyenne de un mètre carré et demi, la pression moyenne que supporte l'homme est donc de 15,500 kilogrammes, pression qui devrait nous écraser, mais à laquelle notre

corps résiste par la réaction et la force élastique des fluides qu'il renferme.

46. Un bon baromètre à mercure. — Les baromètres sont des instruments propres à mesurer la pression atmosphérique.



(Fig. 40.)

Baromètre normal ou Baromètre de Regnault. — C'est-à-dire ce baromètre dont on se sert dans les laboratoires pour les observations qui demandent une grande précision. Ce baromètre est fixe ; il se compose d'une cuvette qui est une caisse rectangulaire *A* à la paroi de laquelle est adaptée une pièce portant un écrou *B*, dans cet écrou passe une vis terminée en pointe à ses deux extrémités et dont la longueur a été déterminée une fois pour toutes. Pour mesurer la hauteur barométrique, on commence par faire affleurer la pointe inférieure de la vis avec la surface du mercure dans la cuvette, ce qui a lieu lorsque la pointe et l'image sont en contact. Si l'on mesure au moyen d'un instrument de précision (le cathétomètre), la distance verticale de la pointe *D* de la vis au niveau *C* du mercure dans le tube, et qu'à cette distance on ajoute la longueur de la vis, on a la hauteur barométrique avec précision.

Un bon baromètre doit satisfaire aux conditions suivantes : le choix du mercure parfaitement pur et exempt d'oxyde, autrement il adhère au verre et le ternit ; l'espace vide, *chambre barométrique* ou *vide de Toricelli*, doit être complètement purgé d'air et de vapeur d'eau; autrement

la force élastique de ces fluides déprimerait la colonne de mercure.

47. Variations de la hauteur barométrique. — Causes des variations barométriques (Notions).

(*a*). *Variations de la hauteur barométrique.*—La hauteur barométrique varie en chaque lieu, non seulement d'un jour à l'autre mais encore dans une même journée.

L'amplitude des variations croît de l'équateur vers les pôles ; les plus fortes variations ont lieu en hiver.

Sous l'équateur la moyenne de la hauteur annuelle est de 0m. 758, et au niveau des mers la moyenne générale de 0m. 761.

Dans le baromètre il y a deux sortes de variations :

1o. Les variations accidentelles qui dépendent des saisons, de la direction des vents ; ce sont celles qu'on observe dans nos climats.

2o. Les variations diurnes qui se produisent périodiquement à certaines heures de la journée ; ce sont celles qu'on observe à l'équateur.

(*b*). *Causes des variations barométriques.*—Le baromètre a en général une marche contraire de celle du thermomètre, c'est-à-dire la température s'élevant, le baromètre baisse, et *vice versa.*

Ceci indique donc que les variations barométriques, en un lieu, y résultent des dilatations ou des contractions de l'air, et, par conséquent, de ses changements de densité. En général une baisse sur un point du globe est compensée par une hausse semblable sur un autre point.

La direction et l'intensité du vent, la plus ou moins grande quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère sont des causes de variations.

Généralement, dans nos climats, le baromètre se tient, par le beau temps, au-dessus de 0.758 et au-dessous de ce point dans les temps de pluie, de neige, de vent ou d'orages.

48. Loi de Mariotte (Enoncé).

Loi.—La température restant la même, le volume d'une masse donnée de gaz est en raison inverse de la pression qu'elle supporte.

Cette loi se vérifie au moyen du tube de Mariotte, qui est un tube recourbé (fig. 41) et à branches inégales, la branche la plus longue étant ouverte, et la plus courte, fermée. On y introduit du mercure de manière qu'il soit au même niveau dans les deux branches, soit à *O* ; dans ces conditions l'air contenu dans la petite branche fait évidemment équilibre à la pression atmosphérique extérieure. Si, dans la grande branche, on verse assez de mercure pour que le volume d'air contenu dans la petite branche soit réduit de moitié, c'est-à-dire que le mercure monte au degré 10, on remarquera que la colonne de mercure ajoutée est absolument égale à la hauteur barométrique, ce que l'on trouve en faisant la différence de niveau *C A* du mercure dans les deux tubes. L'air renfermé supporte donc deux pressions, premièrement celle de la colonne de mercure qui représente une atmosphère et celle de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne, c'est-à-dire deux pressions atmosphériques ; la force élastique de cet air emprisonné dans la petite branche équivaut donc à deux atmosphères. Si on ajoute une seconde colonne de mercure égale à la colonne barométrique, le volume de l'air se réduit au tiers de ce qu'il était primitivement, il supporte alors trois atmosphères.

(Fig. 41.)

Dans cette expérience, la masse d'air renfermée dans le tube, restant la même, sa densité devient nécessairement d'autant

plus grande que son volume et réduit davantage ; d'où l'on déduit le principe suivant :

Pour une même température la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte, c'est-à-dire, sous la pression ordinaire, la densité de l'air étant 773 fois moindre que celle de l'eau, sous une pression de 773 atmosphères l'air aurait la densité de l'eau s'il était encore gazeux.

La loi de Mariotte peut encore s'énoncer en disant : que pour une masse de gaz donnée, prise à la même température, *le produit du volume par la pression est constant.* En effet, soit V le volume à la pression P et V' le volume à la pression P', puisque d'après la loi de Mariotte les volumes sont en raison inverse des pressions, nous aurons :

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P} \quad \text{d'où} \quad V\,P = V'\,P' \quad \text{c'est-à-dire}$$

que le produit du volume par la pression est constant.

De même pour les densités des gaz, étant directement proportionnelles aux pressions, nous aurons la relation suivante :

$$\frac{d}{d'} = \frac{H}{H'}$$

49. Manomètre (défin.). — Manomètre à air libre. — Manomètre à air comprimé (avec graduation expérimentale). — Manomètre métallique et sans mercure.

(*a*). *Manomètre.*—On appelle manomètre des instruments destinés à mesurer la tension des gaz et des vapeurs. L'unité de mesure est la pression atmosphérique correspondant à la hauteur barométrique 0.760 (30 pouces) ; or nous avons vu (45) que cette pression sur 1 cent. carré est de 1 k. 033, par conséquent si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de 2, de 3 atmosphères, cela signifie que sa tension ferait équilibre au poids d'une

(Fig. 42).

colonne de mercure de deux fois, trois fois 76 centimètres de hauteur ; ou bien encore, qu'il exerce, sur chaque centimètre carré des parois qui le contiennent, une pression égale à deux fois ou trois fois 1 k. 033. (Cette pression est égale à 14 liv. 7 par pouce). Il y a trois sortes de manomètres : air libre, air comprimé et métallique.

(*b*). *Manomètre à air libre.*—Le manomètre à air libre (fig. 42) est un tube de cristal *B C* de 5 mètres environ de hauteur, recourbé et terminé par un réservoir *R* dont la partie supérieure communique par un tube *A* avec le récipient fermé dans lequel se trouvent les gaz ou vapeurs dont on veut mesurer la tension. Le réservoir est rempli de mercure. Pour le graduer on laisse communiquer avec l'air le tube qui doit communiquer avec le récipient où se trouvent les gaz ou vapeurs, alors au niveau où s'arrête le mercure, c'est-à-dire une atmosphère; puis, à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5 qui indiquent le même nombre d'atmosphères, et on partage les intervalles en 10 parties égales pour avoir les dixièmes, après quoi on met le tube en communication avec la chaudière. — Le manomètre à air libre ne sert que pour des pressions qui ne dépassent pas 5 à 6 atmosphères.

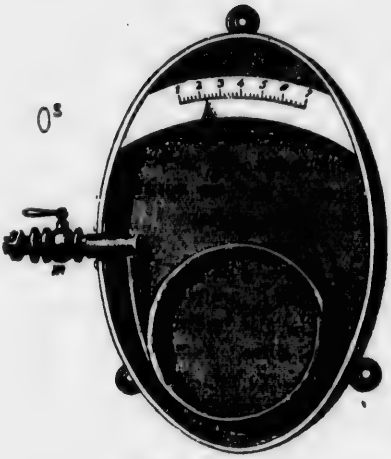
(*c*) *Manomètre à air comprimé.*—Dans le manomètre à air libre la tension se mesure par la hauteur de la colonne de mercure ; dans celui à air comprimé (fig. 43), au contraire, la tension se mesure par la réduction de vo-

(Fig. 43.)

lume qu'elle imprime à une masse donnée d'air. Ce manomètre est composé d'un tube de cristal fermé à son extrémité supérieure et ayant environ 60 à 80 centimètres de longueur ; il est rempli d'air. La partie inférieure plonge dans une boîte en fer *B* contenant du mercure qu'une tubulure latérale *A* met en communication avec la chaudière à vapeur.

On peut le graduer soit par le calcul soit expérimentalement ; pour cette dernière on la fait comparativement à celle d'un manomètre à air libre. Pour cela on règle le niveau du mercure comme dans le tube de Mariotte, ce qui représente une atmosphère, puis alors on fait communiquer l'instrument en même temps que le manomètre à air libre avec un récipient dans lequel on comprime de l'air au moyen d'une pompe foulante. Le mercure s'élevant dans les deux instruments, on marque sur le premier les indications fournies par le manomètre à air libre ; l'instrument se trouve gradué, que le diamètre du tube soit ou non le même dans toute sa longueur.

(*d*). *Manomètre métallique et sans mercure.* — Ce manomètre (fig. 44), encore appelé manomètre anéroïde ou manomètre de Bourdon, repose sur le principe suivant qui est la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression ; un tube à parois flexibles légèrement aplaties sur elles-mêmes et enroulé en spirale dans le sens de son plus petit diamètre, a pour effet de se dérouler par suite des pressions sur ses parois intérieures et de s'enrouler davantage par suite des pressions sur ses parois extérieures.



(Fig. 44.)

Ce manomètre est un tube en laiton flexible, contourné à parois minces et en spirale et aplati; sa section *S* représentant une ellipse, l'une de ses extrémités est fermée et libre et porte une aiguille *e* qui indique sur un arc gradué la tension de la vapeur en atmosphères ; l'autre extrémité *m* est en communication avec une chaudière à vapeur. On la gradue comparativement à un manomètre à air libre comme pour le manomètre à air comprimé (49c).

50. Absorption des gaz par les liquides.—Lois.

(*a*) *Absorption des gaz par les liquides.*—Les liquides absorbent toujours une certaine quantité des gaz avec lesquels ils se trouvent en contact. Les gaz qui exercent une action chimique sur les liquides s'y dissolvent avec une grande facilité, et dans des proportions considérables relativement à ceux qui sont indifférents. Mais dans les mêmes conditions de température et de pression, un même liquide n'absorbe pas des quantités égales de gaz différents.

L'eau, à la température de 10° et à la pression 760 mm, dissout 25 millièmes de son volume d'azote, 46 millièmes de son volume d'oxygène, un volume égal au sien d'a-

cide carbonique et 760 fois son volume d'ammoniaque.

(*b*). *Lois.*—1o. Pour un même gaz, un même liquide, et une même température, le poids de gaz absorbé est proportionnel à la pression, c'est-à-dire qu'à toutes les pressions, le volume dissous est le même.

2o.—La quantité de gaz absorbé est d'autant plus grande que la température est plus basse, c'est-à-dire que la force élastique du gaz est moindre.

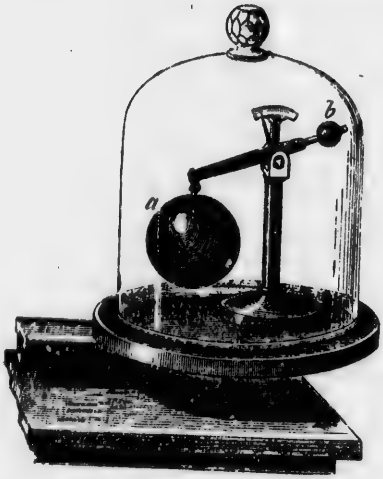
3o.—La quantité de gaz qu'un liquide peut dissoudre est indépendante de la nature et de la quantité des autres gaz qu'il tient déjà en dissolution. C'est-à-dire que si, au lieu d'un seul fluide élastique, l'atmosphère supérieure en contient plusieurs, on trouve que chacun des gaz, quel qu'en soit le nombre, se dissout dans la même proportion que s'il était seul, tenant compte, bien entendu, de la pression qui lui est propre.

51. Principe d'Archimède applicable aux gaz. — Baroscope.

De même que le principe de Pascal (28), c'est-à-dire que les gaz transmettent les pressions suivant les mêmes lois que les liquides, de même le principe d'Archimède (36) leur est applicable, c'est-à-dire qu'un corps plongé dans l'atmosphère y perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace ; comme quand il est plongé dans un liquide où il perd une partie de son poids égale au poids du liquide déplacé.

Baroscope.—Cette perte est démontrée au moyen du baroscope, petite balance portant, à l'une de ses extrémités, une petite masse de plomb *b*, et à l'autre une sphère de cuivre *a* de volume ½ décimètre cube.

Dans l'air les deux corps se font équilibre ; mais le baroscope étant placé sous la cloche d'une machine pneumatique, l'équilibre est détruit si l'on fait le vide, et la sphère l'emporte sur la masse *P*. Donc dans l'air la sphère perdait une partie de son poids égale au poids de



(Fig. 45.)

l'air déplacé ; pour le vérifier on mesure la sphère: supposons qu'elle soit égale à un demi-litre le poids d'un pareil volume d'air étant 0.65, on attache à la petite masse de plomb un poids égal, alors l'équilibre se trouve détruit dans l'air, mais dans le vide il se rétablit ; donc la sphère perd dans l'air une partie de son poids égale au poids de l'air déplacé.

Ce principe nous explique que lorsqu'un corps est plus pesant que l'air, il tombe en vertu de l'excès de son poids sur la poussée du fluide ; s'il est de même densité, il flotte, la poussée et le poids se faisant équilibre, et s'il est plus léger, il s'élève, la poussée l'emportant sur le poids ; c'est le cas de la fumée, des vapeurs, des nuages et des aérostats.

52. Ballons : construction, remplissage et ascension. (Notions succinctes).

Les ballons ou aérostats sont des globes formés par une étoffe à la fois fine, résistante et imperméable, qui tendent à s'élever dès qu'on les emplit d'air chaud ou d'un gaz plus léger que l'air atmosphérique.

Pour obtenir ce résultat, il ne s'agit que de gonfler le

ballon avec un gaz de densité assez faible pour que la densité moyenne de tout l'appareil, contenant, contenu, nacelle et agrès quelconques, soit inférieure à celle de l'air ambiant.

Ce furent les frères Montgolfier, fabricants de papier, qui inventèrent les aérostats ; leur premier ballon était un globe de toile doublé de papier, ouvert à la partie inférieure, et qu'on gonflait d'air chaud, en brûlant au-dessous du papier, de la laine, de la paille mouillée.

L'enveloppe des ballons est formée de longs fuseaux de taffetas cousus ensemble et enduits d'un vernis en caoutchouc, ce qui rend le tissu imperméable. Au sommet se trouve une soupape manœuvrable à la volonté de l'aéronaute. Au-dessous, une nacelle en osier dans laquelle se mettent les personnes.

On gonfle le ballon, soit avec l'hydrogène, soit avec le gaz d'éclairage qui est de l'hydrogène carboné ; ce dernier gaz est employé de préférence comme étant moins coûteux et plus facile à obtenir. Pour les gonfler, on fait arriver le gaz par une ouverture ménagée à sa partie inférieure. Il importe de ne pas gonfler un ballon complètement, car la pression atmosphérique diminuant à mesure qu'il s'élève le gaz intérieur se dilate et tend à le faire crever.

La force ascensionnelle, c'est-à-dire l'excès du poids de l'air déplacé sur le poids total de l'appareil doit être de 4 à 5 kilogrammes. Ce sont les indications du baromètre qui font connaître si le ballon monte ou descend ; dans le premier cas, la colonne de mercure s'abaisse, et elle s'élève dans le second. Pour effectuer la descente, il faut ouvrir la soupape et, pour effectuer l'ascension, refermant la soupape, il faut alléger le ballon en vidant des sacs de toile pleins de sable.

La forme ronde, qu'ont ordinairement les ballons, est

peu propre à la navigation aérienne, aussi, pour y parvenir, cherche-t-on à leur donner une forme allongée qui se rapproche de celle d'un navire ou d'un poisson.

53. Machine pneumatique ordinaire.

La machine pneumatique est un appareil qui sert à raréfier l'air ou un gaz quelconque contenu dans un récipient ; elle fut inventée par Otto de Guerick.

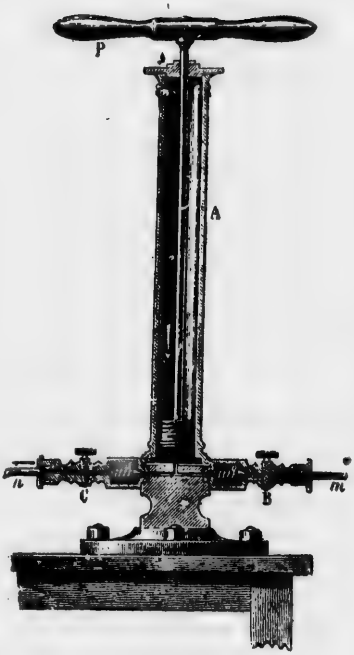
Elle se compose d'une plate-forme de deux corps de pompe en laiton ou cristal, contenant chacun un piston, qui portent à leur centre une tige crémaillère qui engrène avec un pignon et communique avec un levier ; dans l'intérieur des pistons se trouve une soupape conique s'ouvrant de bas en haut ; chaque corps de pompe ou cylindre communique par un même tube se trouvant dans l'intérieur de la plate-forme avec le centre d'un disque en verre placé à l'autre extrémité de cette plate-forme et appelé *platine ;* c'est sur cette platine que se place le récipient dans lequel on veut faire le vide. Le conduit communiquant avec les cylindres est lui-même fermé par une soupape conique actionnée par les pistons, s'ouvrant à la montée et se fermant à la descente. Un robinet, placé sur le trajet du conduit d'aspiration, sert à isoler le récipient d'avec les corps de pompe ou cylindres et permet la rentrée de l'air dans le récipient seul. Un baromètre tronqué ou à siphon, placé sous une éprouvette en cristal et communiquant avec le récipient au moyen d'un conduit, sert à vérifier le degré de raréfaction obtenue, ou mieux à mesurer la force élastique de l'air restant dans le récipient par la différence de niveau du mercure dans les deux branches.

Espace nuisible ; Robinet à double épuisement.—Quelque bien faite que soit une machine, on ne peut éviter au-dessous des soupapes et des pistons un petit espace, appelé *espace nuisible*, où se loge une petite quantité d'air ;

dans ces conditions la raréfaction ne peut dépasser 2 millimètres, c'est-à-dire que la tension de l'air restant fait équilibre à une colonne de mercure de 2 millimètres. Ce fut pour obvier à cet inconvénient que M. Babinet apporta la modification suivante : il plaça, à la bifurcation du canal qui conduit l'air du récipient aux deux corps de pompe, un robinet, percé dans sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement en le tournant, dans deux positions rectangulaires; c'est ce robinet que l'on appelle *robinet à double épuisement*. Suivant sa position, ce robinet peut établir, par un conduit central et par deux conduits latéraux, la communication entre le récipient et les corps de pompe ; l'épuisement ne se faisant plus, on tourne le robinet de 90 degrés et alors les communications sont changées ; deux nouveaux conduits du robinet correspondent l'un avec le récipient et un des corps de pompe, et l'autre met en communication les deux corps de pompe ; par ce moyen un seul piston fait l'épuisement et l'on arrive non pas au vide absolu, mais à faire le vide à un demi-millimètre.

Vide absolu.—Ce vide ne peut s'obtenir non seulement pratiquement, mais même théoriquement ; en effet, supposons le volume du corps de pompe égal à 1 litre, celui du récipient égal à 20 litres, quand le piston est en haut de sa course, le volume d'air, qui était 20, devient $20 + 1 = 21$, c'est-à-dire le volume du récipient plus le volume du corps de pompe ; à chaque coup de piston on n'enlève seulement que $\frac{1}{21}$ de la masse de l'air qui se trouve dans le récipient ; en conséquence, on ne peut donc jamais enlever tout l'air qu'il contient.

54. Pompe à compression. — Cet appareil est une véritable pompe aspirante et foulante, il se compose



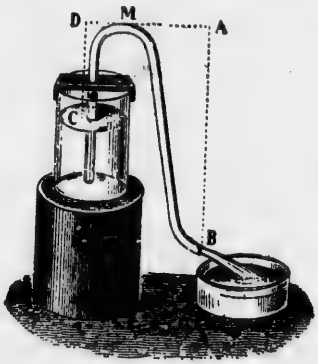
(Fig. 46).

d'un piston plein *P* ; le corps dans lequel il se déplace *A* est muni à sa base de deux tubulures *m* et *n* horizontales et à robinets *B* et *C* dans lesquelles sont deux soupapes *m s* et *m q*, l'une *m s* s'ouvrant de dehors en dedans pour laisser pénétrer l'air, et l'autre *m q* de dedans en dehors pour livrer passage à l'air refoulé. Elle est utilisée pour dissoudre des gaz dans l'eau. Ex. : la fabrication des eaux gazeuses artificielles. On l'utilise dans l'industrie pour la compression de l'air.

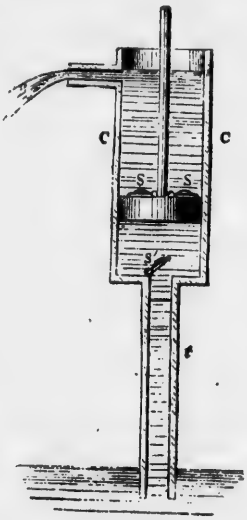
55. Siphon. — On appelle siphon un tube recourbé J et à branches inégales servant à transvaser les liquides.

Soit un siphon *C M P*, dans ce siphon l'écoulement a lieu en vertu de la différence de deux forces. La première, qui agit sur le liquide en *C* et qui le force à s'écouler dans la direction de *C M B* et qui est égale à la pression atmosphérique, moins le poids de la colonne d'eau dont la hauteur est *C D*. De même en *B* la force qui sollicite le liquide dans la direction de *B M C* est égale à la pression atmosphérique moins le poids de la

colonne d'eau *B A*, cette dernière étant plus grande que la première, la pression atmosphérique agissant en *B* sera donc plus petite que celle agissant en *C*, c'est cette différence qui, en *B*, donnera lieu à l'écoulement.



(Fig. 47).



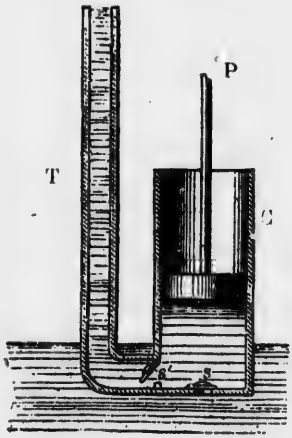
(Fig. 48).

56 Pompe aspirante et foulante.— Les pompes sont des machines employées pour élever les liquides à une hauteur plus ou moins considérable au-dessus du niveau du réservoir où ils sont contenus.

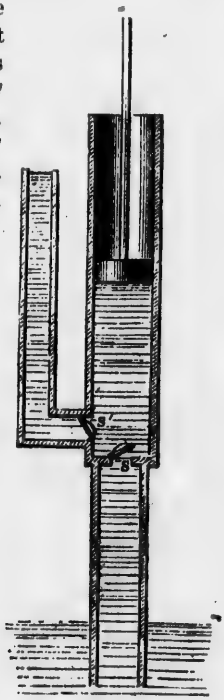
(*a*). *Pompe aspirante.* — Elle se compose d'un cylindre *C* (fig. 48) dans lequel se meut un piston *P* muni de deux soupapes *S*, *S'* s'ouvrant de dedans en dehors, d'un tuyau *T* d'aspiration faisant suite au cylindre dont il est séparé par une soupape *S* s'ouvrant aussi de dedans en dehors. Cette pompe est une sorte de machine pneumatique ; en la faisant fonctionner on raréfie l'air et alors l'eau monte par l'effet de la pression atmosphé-

rique ; mais la hauteur de la colonne d'eau ne peut dépasser 10m. 33 qui est la colonne faisant équilibre à la pression atmosphérique.

(*b*). *Pompe foulante.* — Dans cette espèce de pompe, le piston *P* est plein, c'est-à-dire qu'il ne porte pas de soupape ; le corps de pompe *C* plonge dans l'eau et est muni à sa partie inférieure d'une soupape *S* s'ouvrant de bas en haut et presque à la même hauteur, mais latéralement d'une seconde soupape *S'* s'ouvrant de dedans en dehors et communiquant avec le tuyau d'ascension *T*.



(Fig. 49).



(Fig. 50).

Ce genre de pompe n'utilise pas la pression atmosphérique, elle agit seulement par pression.

La force nécessaire pour abaisser le piston est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la surface inférieure du piston et pour hauteur la distance verticale de cette base au niveau de l'eau élevée dans le tube ascentionnel..

(*c*). *Pompe aspirante et foulante.*—Cette pompe est une combinaison des précédentes ; elle se compose d'un corps de pompe *C* dans lequel se meut un piston *P* plein communiquant avec un tuyau d'aspiration *T'* par une soupape *S* s'ouvrant de bas en haut, et avec le tuyau d'ascension *T* par une soupape *S'* s'ouvrant de dedans en dehors ; cette dernière soupape est placée à la partie inférieure et latérale du corps de pompe. Ce genre de pompe a pour but d'élever l'eau par aspiration et pression ; mais son écoulement est intermittent et n'a lieu que lorsque le piston s'abaisse, et s'arrête quand il remonte ; on corrige ce défaut au moyen du réservoir d'air, ce qui a lieu dans les pompes à incendie.

CHAPITRE SEPTIEME.

ACOUSTIQUE.

57. Son et bruit. (Défin.) —L'acoustique est la partie de la physique qui traite des propriétés du son.

(*a*). *Son.*—Le son est l'impression produite sur l'organe de l'ouïe par les vibrations des corps, vibrations qui se transmettent par le milieu environnant.

(*b*). *Bruit.*—Le bruit diffère du *son* en ce qu'il n'exprime qu'une sensation instantanée ou un mélange confus de sons qui n'ont entre eux aucun rapport musical.

58. Cause du son. — Le son ne se propage pas dans le vide. (Notions).

(*a*). *Cause du son.*—La cause du son est le résultat d'un mouvement vibratoire imprimé à la matière.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE

Un *corps sonore* est celui qui rend un son ; une *vibration simple* est le mouvement qui ne comprend qu'une *allée* ou qu'un *retour* des molécules vibrantes ; une *vibration double* ou *complète* comprend *l'allée* et le *retour*.

On dit qu'une tige *vibre* quand, fixée par une de ses extrémités, elle exécute des mouvements de va-et-vient par sa partie libre.

La *tonalité* d'un *son* est son degré de gravité ou d'*acuité* ; la tonalité dépend absolument du nombre de vibrations exécutées dans un temps donné.

Le son peut être produit par le choc, le frottement.

(*b*). *Le son ne se propage pas dans le vide.*—Il faut absolument, pour que nous percevions un son, qu'il y ait, entre le corps sonore et le tympan de notre oreille, un milieu pondérable qui, vibrant avec le corps sonore, puisse nous transmettre les vibrations ; ce milieu est ordinairement l'air ; pour le prouver, on place sous la cloche d'une machine pneumatique un timbre en mouvement, si on fait le vide on remarque que le son devient de plus en plus faible à mesure que l'on enlève l'air, et qu'il cesse d'être perceptible lorsque le vide est fait.

59. Mode de propagation du son dans l'air. — Pour se faire une idée du mécanisme de la propagation du son dans l'air, observons la chute d'une pierre dans une nappe d'eau tranquille.

La pierre, en tombant, frappe l'eau et la déprime d'abord au lieu de la chute, mais aussitôt, l'eau se relève tout autour du centre de dépression et il se forme un bourrelet circulaire qui s'étend lentement en s'agrandissant à la surface de l'eau et qui perd en épaisseur à mesure qu'il gagne en étendue ; c'est ce qu'on appelle une *onde condensée*. Pendant que cette onde condensée se propage à la surface de la nappe d'eau, le liquide s'est relevé au centre et a formé, au lieu de la dépression initiale, une éminence de même volume. Cette

petite montagne ne peut se produire qu'autant qu'il se creuse autour d'elle une petite vallée ; d'où il résulte un nouveau bourrelet circulaire, qui est en *creux* au lieu d'être en *relief*, et qui se propage, comme le précédent, par cercles concentriques au centre d'ébranlement.

De même que l'on a appelé *onde condensée* celle qui résultait d'une compression, de même on appelle *onde dilatée* cette dernière, qui résulte d'une sorte de dilatation sur place de milieu élastique. L'ensemble de ces deux ondes contraires constitue une *onde complète*. Le son lui-même se propage par une série d'ondes alternativement condensées et dilatées exactement comme pour la chute de la pierre dans l'eau.

60. Causes qui font varier l'intensité du son. — L'intensité du son, c'est-à-dire la force avec laquelle il se fait entendre, dépend de l'amplitude des vibrations qui le produisent, mais non de la quantité de vibrations exécutées dans un temps donné.

L'intensité est modifiée par certaines conditions particulières qui sont :

1o. La distance.—L'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance du corps sonore.

2o. L'amplitude des vibrations.—L'intensité du son augmente avec l'amplitude des vibrations du corps sonore.

3o. La densité de l'air.—L'intensité du son dépend de la densité de l'air dans le lieu où il se produit.

4o. La direction des vents.—L'intensité du son est modifiée par l'agitation de l'air et la direction des vents.

5o. Le voisinage d'autres corps sonores.—Le son est renforcé par le voisinage d'un corps sonore.

61. Vitesse du son dans l'air. (*Sa valeur, comment on l'a déterminée et comment elle varie avec la température*).

De nombreuses expériences ont été faites pour déterminer la vitesse du son. Chacun sait que, d'une cer-

taine distance, on aperçoit la lumière d'une arme à feu avant d'entendre la détonation. La vitesse de la lumière est tellement grande (77,000 lieues par seconde) qu'on peut regarder, en ce cas, sa propagation comme instantanée. Cette considération donna le moyen le plus simple, le plus naturel pour calculer la vitesse du son.

On appelle *vitesse du son*, dans un milieu élastique qui le transmet, *l'espace qu'il y parcourt en une seconde.*

La méthode pour calculer la vitesse du son dans l'air fut la suivante : Arago, Gay Lussac, de Humboldt et Prony se partagèrent en deux groupes, les uns sur les hauteurs de Villejuif et les autres à Montlhéry ; à chaque station de 10 en 10 minutes on tirait un coup de canon ; chacun de leur côté les observateurs notaient, à l'aide de chronomètres, le temps qui s'écoulait entre le moment où ils apercevaient la lumière et celui où ils entendaient le bruit. Ils constatèrent que la durée moyenne de propagation entre les deux stations était de 54 secondes 6, et divisant par ce nombre la distance des deux stations qui était de 18,612m. 52, ils trouvèrent que la vitesse du son était de 340m. 9, la température étant de 16° C. La température baissant la vitesse du son décroît, à 10° elle n'est que de 337 mètres et à zéro, de 333 mètres. La vitesse est indépendante de la pression, mais elle varie avec la nature du gaz dans lequel le son se propage.

62. Echo et résonnance (notions).

(*a*). *Echo.*—L'écho est la répétition distincte d'un son réfléchi par un obstacle. Pour un son très bref, comme un choc, il peut y avoir écho lorsque la surface réfléchissante est distante seulement de 17 mètres ; cela résulte de ce fait physiologique qu'une sensation sonore persiste au moins un dixième de seconde ; or, le son parcourant 340 mètres en une seconde, dans un dixième de seconde il parcourt 34 mètres ; et pour qu'il y ait

retour, c'est-à-dire écho dans le dixième de seconde, il faut donc que la surface réfléchissante soit à 17 mètres ; dans ces conditions il y a écho, le son mettant un vingtième de seconde à parcourir les 17 mètres d'aller et un vingtième de seconde à parcourir les 17 mètres de retour, ce qui représente en tout un dixième de seconde ; dans ces conditions le son aura parcouru 17 mètres d'aller et 17 mètres de retour, c'est-à-dire 34 mètres pendant un dixième de seconde, durée de la sensation sonore.

Pour les sons articulés, il faut au moins une distance double, c'est-à-dire 34 mètres, pour que l'écho soit perçu nettement ; ce qui est une conséquence de ce fait, qu'on ne peut prononcer ou entendre bien distinctement plus de cinq syllabes par seconde. Or la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, dans un cinquième de seconde le son parcourt 68 mètres ; et si l'obstacle réfléchissant est à une distance de 34 mètres, le son, tant pour l'aller que pour le retour, aura 68 mètres à parcourir. Le temps écoulé entre le son articulé et le son réfléchi sera donc d'un cinquième de seconde ; dès lors les deux sons ne se confondront pas et le son réfléchi sera entendu distinctement. D'après cela, si l'on parle à voix haute devant un réflecteur distant de 34 mètres, on ne peut distinguer que la dernière syllable réfléchie, l'écho est *monosyllabique*, et à des distances du réflecteur de deux, trois fois 34 mètres, l'écho sera *dissyllabique*, *trissyllabique*, etc., etc.

(*b*) *Résonnance.*—On donne le nom de résonnance au son qui résulte de la confusion du son primitif avec le son réfléchi, ce qui a lieu lorsque la distance de la surface réfléchissante est moindre de 34 mètres pour les sons articulés et 17 mètres pour les bruits isolés. C'est ce qu'on observe dans les grands appartements. Les salles nues sont très retentissantes ; au contraire les

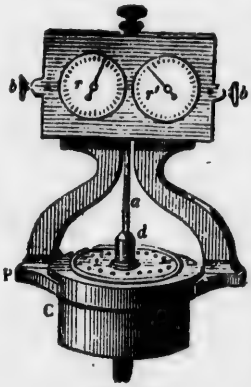
tentures et les draperies qui réfléchissent mal le son, rendent les appartements *sourds*.

63. Méthodes pour mesurer le nombre de vibrations ; 1. Une méthode acoustique ; 2. Une méthode graphique (au choix de l'élève).

La hauteur du son dépendant de la rapidité du mouvement vibratoire, il en résulte que plus le nombre des vibrations exécutées dans un temps donné est grand, plus le son est *haut* ou *aigu* ; au contraire, plus ce nombre est petit, plus le son est *bas* ou *grave*.

Le nombre de ces vibrations est mesuré soit par la méthode acoustique, soit par la méthode graphique.

(*a*). *Méthode acoustique.*—Pour cela on se sert d'un appareil appelé la *Sirène* et inventé par Cagnard-Latour. Cet appareil se compose d'une soufflerie qui introduit l'air, par un jet continu, dans une caisse cylindrique *C* fermée à sa partie supérieure par un plateau *P* percé de trous inclinés à sa surface et disposés circulairement à égale distance les uns des autres. Sur ce plateau s'applique très près, mais sans contact, un disque très mobile autour de l'axe *a*, et percé d'orifices correspondants à ceux du plateau, mais inclinés en sens contraire.



(Fig. 51).

L'axe de rotation porte une vis sans fin qui transmet le mouvement à une roue dentée, de manière à la faire avancer d'une dent, à chaque révolution du disque. Les tours de cette roue sont marqués par une seconde roue dentée qu'elle fait mouvoir au moyen d'un taquet ou [illegible] adapté à son axe. Les axes des deux roues font

tourner deux aiguilles qui indiquent, l'une le nombre des tours du disque, l'autre le nombre des tours de la première roue.

Voici le jeu de l'appareil. On insuffle de l'air dans la caisse cylindrique avec une intensité telle que l'on obtient le son musical donné. Ce son se produit par l'effet de l'air qui, passant par les orifices du plateau, vient frapper obliquement les parois des trous du disque, et qui, alternativement intercepté ou s'écoulant librement, vibre avec une rapidité d'autant plus grande que les intermittences sont plus rapprochées. Le disque prend un mouvement de rotation d'autant plus rapide que le courant est plus intense et chacune de ses révolutions donne autant de vibrations qu'il a d'orifices.

Supposons que le plateau fixe ne porte qu'un trou et qu'il y en ait vingt dans le disque, chaque révolution de ce dernier interrompra vingt fois, laissera vingt fois libre le passage de l'air, et donnera conséquemment vingt vibrations complètes. Si le plateau porte également vingt orifices, les dix-neuf orifices nouveaux ne font qu'accroître l'intensité du son fourni par le premier. On calculera donc le nombre de vibrations, correspondant à un son donné, en multipliant le nombre des trous du disque par le nombre de ses révolutions.

Pour obtenir ce dernier nombre, on force le vent jusqu'à ce qu'on arrive au son déterminé. Alors en pressant un bouton *b* (fig. 51), on engage les dents de la roue dans le filet de la vis sans fin, et l'on observe, d'après les cadrans, le nombre des tours effectués par le disque pendant un temps marqué par un chronomètre ; puis on désengrène la roue en poussant le bouton *b'*.

Admettons que la roue *r* porte cent dents et que l'aiguille de la roue *r'* marque 25 degrés, le nombre des vibrations exécutées pendant le temps de l'observation sera égal au produit $20 \times 25 \times 100 = 50{,}000$.

(*b*). *Méthode graphique.*—Cette méthode consiste à faire inscrire par le corps vibrant lui-même les vibrations qu'il exécute. On reproduit, avec une tige élastique serrée dans un étau et munie d'une pointe fixe à son extrémité libre, le son qu'il s'agit d'étudier. Au moment où la tige a été mise en mouvement à l'aide d'un archet, on fait passer au contact de la pointe, qui oscille, une surface recouverte de noir de fumée ou de collodion.

Chaque demi-vibration trace un petit trait oblique. Il ne s'agit plus que de compter ces traits après un temps connu, pour avoir le nombre de vibrations cherché.

64. Qualités du son musical : hauteur, intensité, timbre (déf. et causes).

L'oreille distingue dans le *son musical*, qui est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, trois qualités particulières, la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre*.

(*a*). *Hauteur.*—L'impression qui résulte pour l'oreille du plus ou moins grand nombre de vibrations dans un temps donné est la *hauteur* du son. Les *sons graves* correspondent à un petit nombre de vibrations et les *sons aigus* à un grand nombre. Le *ton* exprime le degré de hauteur d'un son, c'est le rapport de gravité ou d'acuité de deux sons.

(*b*). *Intensité.*—L'intensité ou la force du son dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre.

(*c*). *Timbre.*—Le timbre du son est indépendant de la hauteur et de l'intensité ; deux instruments différents rendant chacun un son de même hauteur et intensité peuvent être parfaitement distingués l'un de l'autre.

Ex. : hautbois et flûte.

65. Accords et intervalles (déf.). — Harmoniques (déf.). — Echelle musicale et gamme (déf. et rapports des différents degrés).

(*a*). *Accords.*—L'accord est l'émission simultanée de

certains sons musicaux produisant sur l'oreille une sensation agréable.

(*b*). *Intervalles.*—L'intervalle musical est la distance d'un son à un autre plus aigu ou plus grave.

(*c*). *Harmoniques.*—On nomme Harmonique une suite d'accords.

(*d*). *Echelle musicale et gamme.* — On appelle échelle musicale une série de sons séparés les uns des autres par des intervalles, et chaque série se reproduit dans le même ordre par périodes de sept sons ; c'est cette série de sept sons différents appelés *notes* que l'on appelle *gamme.*

(*e*). *Rapports des différents degrés.*—Si on représente par 1 la longueur de la corde du sonomètre et qu'on prend pour *ut* fondamental le son qu'elle produit quand elle vibre entièrement, on doit, pour obtenir les autres notes, donner à la corde les longueurs suivantes :

Notes	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
Longueur de la corde	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$
Nombres relatifs de vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

66. Vibrations transversales des cordes (énoncé des lois). — Nœuds et sons harmoniques des cordes, leur existence et leur relation mutuelle.

(*a*). *Vibrations transversales des cordes, lois.*

1°.—La tension d'une corde étant constante, le nombre des vibrations, dans le même temps, est en raison inverse de la longueur.

2°.—Le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.

3°.—Le nombre des vibrations d'une corde est directe-

ment proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.

4°.—Le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.

(*b*). *Nœuds et sons harmoniques des cordes, leur existence et leur relation mutuelle.*—Quand on fait vibrer un corps, non seulement il vibre dans son ensemble, mais il se divise en un certain nombre de parties, dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres ; entre ces parties il existe des points et des lignes sensiblement fixes que l'on appelle *nœuds* et *lignes nodales* et les parties vibrantes constituent les *ventres de vibrations.*

Les *harmoniques* se produisent quand une corde un peu longue vibre dans son entier ; on peut distinguer, outre le son fondamental, l'octave aiguë du son fondamental. la quinte de l'octave, la double octave et la tierce majeure.

67. Tuyaux sonores (déf.). — Tuyaux à bouche. — Tuyaux à anche.

(*a*). *Tuyaux sonores.*—On appelle ainsi des tubes au moyen desquels on obtient des sons en faisant vibrer la colonne d'air qu'ils contiennent. Il y a deux sortes de tuyaux sonores, les tuyaux à *embouchure de flûte* ou *tuyaux à bouche* et les *tuyaux à anche.*

Pour qu'un son se produise dans un tuyau, il faut exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions qui se propagent à toute la colonne d'air, c'est pourquoi l'embouchure a une forme convenable ne permettant à l'air d'entrer que par intermittence et non d'une manière continue.

(*b*). *Tuyaux à bouche.*—Dans ces tuyaux toutes les parties de l'embouchure sont fixes. Ex. : tuyaux d'orgue ordinaire ; dans ce genre de tuyaux, l'air vient se briser contre un biseau, qui forme la lèvre supérieure de la bouche. Le choc de l'air contre le biseau engendre des

vibrations qui se communiquent à la masse gazeuse contenue dans le tuyau et le font résonner.

(*c*). *Tuyaux à anche.*—Dans ces tuyaux l'air est mis en vibration au moyen d'une lame élastique ou *anche* qui alternativement l'intercepte ou lui livre passage.

Les instruments à anche se divisent :

1°. Instruments à bec ou instruments à anche proprement dits. Ex. : la clarinette, le hautbois, le basson.

2°. En instruments à bocal, c'est-à-dire à embouchure. Ex. : le clairon, le cor, le cornet à piston, ce sont les lèvres qui font office d'anche double.

68. Nœuds et ventres de vibrations dans les tuyaux sonores (déf. et expériences qui les démontrent, indication de leur cause).

Il existe dans la colonne d'air, de distance en distance, des tranches fixes qui sont des nœuds, et entre chaque nœud un ventre de vibration ; pour le démontrer on suspend à un fil un anneau de carton recouvert de baudruche sur laquelle on met du sable, et on descend le tout lentement dans un tuyau qui parle et l'on observe que, de distance en distance, les grains de sable ne reçoivent aucun mouvement : c'est là que sont les nœuds ; tandis que, dans les positions intermédiaires, ils sont projetés : ce sont les vibrations.

Dans les tuyaux fermés, la cause des nœuds et des ventres de vibration est due à la réflexion des ondes sonores sur le fond, et dans les tuyaux ouverts elle est due à ce que les ondes sonores se réfléchissent contre la masse d'air indéfinie située à l'extérieur.

CHAPITRE HUITIEME.

CHALEUR.

69. Chaleur, hypothèse sur sa nature, ou théorie dynamique (notion succincte.)

La chaleur est la cause de nos sensations de froid et de chaud, c'est elle qui fait fondre les corps solides et bouillir les liquides, qui fait dilater tous les corps et qui rend les métaux et certains autres corps incandescents.

Deux hypothèses principales ont été émises, celle du système de l'*émission* et celle des *ondulations*.

D'après l'hypothèse de l'émission, la chaleur serait l'effet produit par une matière très subtile, impondérable et incoercible émanant des corps chauds, pour se répandre dans toutes les directions, auquel on a donné le nom de *calorique*.

D'après l'hypothèse des *ondulations*, système adopté aujourd'hui, la chaleur résulterait d'un mouvement de vibrations très petit, mais très rapide des molécules des corps et qui serait transmise à distance par l'intermédiaire d'un milieu élastique, *l'éther*. De même que les ondes sonores de l'air propagent le son, de même les ondulations de ce fluide élastique, l'éther, qui transmettent le mouvement, nous transmettent la chaleur. En sorte que, dans la théorie des ondulations ou *théorie dynamique*, tous les phénomènes calorifiques sont ramenés à une cause unique, le mouvement.

70. Thermomètres (déf.). — Thermomètre à mercure (division du tube en parties d'égale capacité, remplissage, détermination des deux points fixes, graduation). — Différentes échelles thermométriques. — Limite de l'emploi du thermomètre à mercure.—Thermomètre à alcool.

(*a*). *Thermomètres.*—Les thermomètres sont des appareils servant à mesurer la température.

La température d'un corps est l'état actuel de la chaleur sensible dans ce corps, sans augmentation ni diminution.

(*b*). *Thermomètre à mercure.*—Le thermomètre à mercure est celui de tous les thermomètres à liquide le plus répandu et présentant le plus d'avantage. Il se compose d'un tube capillaire soudé à un réservoir cylindrique.

La construction comprend trois opérations : 1° division du tube en parties d'égale capacité ; 2°. l'introduction du mercure dans le réservoir ; 3°. la graduation.

1°. *Division du tube en parties d'égale capacité.*—Pour cela, on choisit autant que possible un tube dont le diamètre intérieur soit partout le même ; on le reconnaît en faisant circuler dans son intérieur une petite colonne de mercure de 1 à 2 centimètres de longueur qu'on a soin de maintenir à zéro. Si, dans chaque position, le mercure occupe toujours un espace de même longueur, on peut considérer le canal du tube comme parfaitement cylindrique, le tube étant ainsi vérifié, on soude à l'une de ses extrémités un réservoir d'une capacité suffisante.

2°. *Introduction du mercure dans le réservoir ou remplissage.* Pour introduire le mercure, on soude à l'extrémité supérieure de la tige un entonnoir qu'on emplit de mercure, puis inclinant le tube, on dilate l'air en chauffant le réservoir ; l'air dilaté sort en partie par l'entonnoir, puis on le laisse refroidir, ce qui lui fait perdre une partie de sa force élastique ; alors, ne faisant plus équilibre à la pression atmosphérique, cette dernière force le mercure à rentrer, il descend jusqu'à ce que l'air diminuant de volume ait acquis une force élastique suffisante pour résister à la pression de l'atmosphère et au poids de la colonne de mercure qui est dans le tube ; alors on recommence à chauffer comme nous l'avons déjà dit et le même phénomène se passe ; l'instrument rempli, on enlève l'entonnoir et on soude l'extrémité du tube à la lampe. Mais il faut avoir soin,

au moment où l'on ferme le tube, de chauffer le sommet du tube ; de cette façon, il n'y a plus d'air au moment de la fermeture.

3°. Détermination des deux points fixes ; graduation.

Détermination du zéro.—Pour cette opération, on plonge le réservoir du thermomètre dans un vase plein de glace pilée ; on l'y maintient jusqu'à ce que le niveau du mercure devienne stationnaire, alors au point où s'arrête le mercure on marque un trait sur la tige, c'est la place du zéro.

Détermination du point 100.—Pour cette opération, on plonge le thermomètre dans de la vapeur produite par l'eau distillée en ébullition et sous la pression 760mm., le mercure, après s'être dilaté, s'arrête à une certaine hauteur de la tige du thermomètre, et s'y maintient ; à ce point d'arrêt on marque un trait sur la tige, c'est la place de 100.

Graduation.—Les deux points fixes obtenus, on partage l'intervalle qui les sépare en 100 parties égales qu'on nomme degrés, et l'on continue ces divisions au-dessus du point 100 et au-dessous de zéro. Ce thermomètre, eu égard à sa graduation qui est appelée échelle centigrade, a reçu le nom de *thermomètre centigrade.*

(c). Différentes échelles thermométriques. — On distingue trois échelles :

1° Echelle centigrade ;
2° " Réaumur ;
3° " Fahrenheit.

1°. Echelle centigrade, c'est celui que nous venons de décrire.

2°. Echelle Réaumur. — Dans cette échelle, les deux points fixes correspondent à ceux du thermomètre cen-

tigrade, mais dont l'intervalle est divisé en 80 parties. c'est-à-dire que 80° *Réaumur* = 100° centigrades.

1°. Réaumur $= \frac{100}{80}$ ou $\frac{5}{4}$ de degré centigrade et réciproquement :

1°. Centigrade $= \frac{80}{100}$ ou $\frac{4}{5}$ de degré Réaumur d'où, pour convertir un nombre de degrés *R.* en degré *C.*, il faut multiplier le degré *R.* par $\frac{5}{4}$, d'où la formule : $tc = tR \times \frac{5}{4}$

3°. *Echelle Fahrenheit.*—Dans cette graduation, le point fixe supérieur correspond à l'eau bouillante, mais le zéro correspond au degré de froid produit par un mélange à poids égaux de sel ammoniac et de neige ; l'intervalle des deux points est divisé en 212 degrés. Ce thermomètre, dans la glace fondante, marque 32°, par conséquent 100° *C.* = 212 — 32 = 180, d'où

1°. *C.* vaut donc $\frac{180}{100} = \frac{9}{5}$ de degré *F.*, et alors

1°. *F.* vaut donc $\frac{100}{180} = \frac{5}{9}$ de degré *C.*, d'où la formule :

$$t\ c. = (t\ F. - 32)\ \frac{5}{9}$$

et pour passer du thermomètre *F.* au thermomètre *R.*, nous aurons la formule : $t\,R. = (t\,F. - 32)\ \frac{4}{9}$

(*d*). *Limite de l'emploi du thermomètre à mercure.* — Le mercure entrant en ébullition à 350 degrés et se congelant à 39°, ce sont donc les deux limites qu'on ne peut

dépasser dans l'emploi de thermomètre à mercure ; mais les indications précises ne sont que de —36 à 100 degrés, au dela de 100 degrés le coefficient de dilatation du mercure va en augmentant.

(*e*). *Thermomètre à alcool.*—Le thermomètre à alcool a la même forme que le thermomètre à mercure, il n'en diffère que parce qu'il est rempli d'alcool coloré en rouge avec de l'orseille ; son remplissage est basé sur le même principe que celui du mercure, c'est-à-dire dilatation de l'air ; et pour sa graduation, on prend le zéro de la glace fondante et les autres points sont déterminés comparativement avec un thermomètre étalon à mercure, en prenant comme limite de l'échelle 60 à 70 degrés ; car au delà l'alcool entre en ébullition (79°). Ce thermomètre est principalement employé pour les basses températures, de même que celui à mercure pour les hautes températures.

71. Dilatation linéaire et dilatation cubique des solides, coefficient de dilatation (déf.). — Principales formules relatives aux dilatations des solides.

(*a*). *Dilatation linéaire et dilatation cubique des solides, coefficient de dilatation.* — Dans les corps solides il y a deux dilatations, la *dilatation linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, c'est-à-dire en volume.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que prend l'unité de longueur d'un corps, lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, c'est-à-dire une élévation de température de 1 degré; et *coefficient de dilatation cubique*, l'accroissement que prend dans le même cas l'unité de volume.

Le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire. En effet : soit un cube dont le côté égale 1 à zéro et soit K son allongement en

passant de zéro à 1 degré (K étant le coefficient de dilatation linéaire) sa longueur sera

$$1 + K$$

et le volume du cube, qui était 1 à zéro, sera actuellement: $(1 + K)$ 3, c'est-à-dire en développant $= 1 + 3K + 3K^2 + K^3$; en effet :

$$\begin{array}{l}
1 + K \\
1 + K \\
\hline
1 + K \\
\quad\;\; K + K^2 \\
\hline
1 + 2K + K^2 \\
\quad\;\; 1 + K \\
\hline
1 + 2K + K^2 \\
\quad\;\; K + 2K^2 + K^3 \\
\hline
1 + 3K + 3K^2 + K^3 = (1 + K)^3
\end{array}$$

or dans l'expression $1 + 3K + 3K^2 + K^3$ l'allongement K étant une fraction très petite son carré K^2 et son cube K^3 sont des fractions assez petites pour ne pas influer sur les dernières décimales des nombres qui représentent les coefficients de dilatation cubique. On peut donc négliger les termes K^2 et K^3 et alors le volume à 1 degré devient très approximativement : $1 + 3K$.

L'accroissement du volume est donc $3K$, c'est-à-dire triple du coefficient de dilatation linéaire qui est K.

Le coefficient de *dilatation superficielle* serait $2K$, c'est-à-dire double du coefficient de dilatation linéaire.

(*b*). *Principales formules relatives aux dilatations des solides.*

Soit : lo = longueur d'une barre à zéro.
lt = sa longueur à t degré.
K = son coefficient de dilatation linéaire.

Pour l'unité de longueur, l'allongement correspondant

à 1 degré étant K, à t^0 degrés sera Kt ou t fois K d'où il est l_0 fois Kt ou $Kt\ l_0$ pour l_0 unités.

La longueur de la barre, qui était l_0 à zéro, est donc à t degrés premièrement sa longueur l_0 plus son allongement $Kt\ l_0$ c'est-à-dire $l_0 + Kt\ l_0$, ce qui nous donne la formule

$$lt = l_0 + Kt\ l_0 \qquad [1]$$

et en mettant l_0 en facteur commun, nous aurons :

$$lt = l_0\ (1 + Kt) \qquad [2]$$

de la formule [2] nous tirons pour la valeur de l_0

$$l_0 = \frac{lt}{l + Kt} \qquad [3]$$

de la formule [1] nous tirons pour valeur de K

$$K = \frac{lt - l_0}{t\ l_0} \qquad [4]$$

Même raisonnement pour les *volumes;* en remplaçant les lettres l_0 et lt par les lettres V_0 et Vt, et en triplant le coefficient de dilatation linéaire K, alors nous aurons

$$Vt = V_0 + 3\ K\ t\ V_0 \qquad [5]$$

et en mettant le second membre V_0 en facteur commun nous aurons

$$Vt = V_0\ (1 + 3\ K\ t) \qquad [6]$$

de la formule [6] nous tirons pour la valeur de V_0

$$V_0 = \frac{Vt}{1 + 3\ K\ t} \qquad [7]$$

de la formule [5] nous tirons pour la valeur de $3\ K$

$$3\ K = \frac{Vt - V_0}{V_0\ t} \qquad [8]$$

Comme on sait que le coefficient de dilatation cubique

est triple du coefficient de dilatation linéaire, c'est-à-dire = à 3 K, ordinairement cette valeur 3 K est remplacée par une lettre unique D ou autres, et alors dans les formules [5, 6, 7 et 8] la valeur de 3 K serait remplacée par la lettre D.

Les binômes $1 + K\,t$ et $1 + 3\,K\,t$, ou encore $1 + D\,t$ se désignent sous les noms, l'un de *binôme de dilatation linéaire*, l'autre *binôme de dilatation cubique*.

Notes.—1°. Une barre métallique a une longueur lt à t degrés, quelle sera sa longueur L à t' degrés, son coefficient de dilatation étant K ?

Cherchons d'abord la longueur de la barre à zéro et nous trouverons, d'après la formule [3], page 116, qu'elle est

$$lo = \frac{lt}{1 + K\,t}$$

de cette longueur à zéro, on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [2] page 116, dans laquelle on remplace lo par sa valeur ci-dessus, ce qui nous donne :

$$L = \frac{lt\,(1 + K\,t')}{1 + K\,t}$$

2°. A l'aide d'une règle métallique divisée en millimètres, on mesure à t degrés une longueur donnée, et l'on trouve que cette longueur contient n divisions de la règle. Mais la règle ayant été divisée à la température de zéro, il faut donc en faire la correction en tenant compte de sa dilatation de zéro à t degrés, autrement notre mesure ne serait pas juste.

Pour cela, remarquons que c'est seulement à zéro que les divisions de la règle valent 1 millimètre ; à t degrés chacune d'elles vaut $1 + K\,t$, K étant le coefficient de dilatation de la règle. Donc les n divisions obtenues représentent non pas n millimètre, mais $n\,(1 + K\,t)$.

Tel est donc le nombre de millimètres correspondant à la longueur qu'on a mesurée.

3°. La densité d'un corps étant d à zéro, calculer sa densité d' à t degrés.

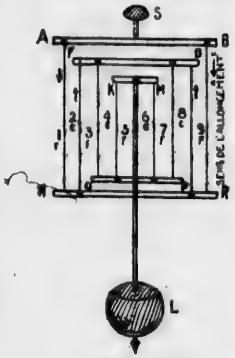
Soit 1 le volume du corps à zéro et D son coefficient de dilatation cubique, le volume à t degrés sera $1 + D\,t$; et d'un autre côté nous savons que la densité d'un corps est en raison inverse du volume qu'il prend en se dilatant, nous aurons donc :

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + D\,t} \quad \text{d'où} \quad d' = \frac{d}{1 + D\,t}$$

d'où la loi : lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, sa densité, et par suite son poids, à volume égal, varient en raison inverse du binôme de dilatation $1 + D\,t$.

72. Pendule compensateur à gril : mode d'action.

On nomme pendule compensateur à gril, un pendule dans lequel l'allongement de la tige, quand la température s'élève, est compensé de manière que la distance entre le centre d'oscillation et le centre de suspension demeure constante.



(Fig. 52).

Soit un pendule à gril, (fig. 52), dans ce système la lentille L, au lieu d'être soutenue par une seule tige, l'est par une suite de châssis qui sont $A\ B$, $F\ D$, $K\ M$, $O\ P$ et $N\ R$ dont les tiges verticales sont alternativement d'acier f et de laiton c. Les tiges d'acier f sont au nombre de cinq et représentées par les chiffres 1, 3, 5, 7, 9, plus une lame d'acier S qui porte tout le pendule et se courbe à chaque oscillation. Les tiges de laiton sont au nombre de quatre représentées par les chiffres 2, 4, 6, 8. La tige qui porte la lentille est fixée à la traverse horizontale $K\ M$.

Les tiges d'acier 1 et 9 sont fixées à la traverse *A B* ; 3 et 7 à la traverse *F D* et la 5 portant la lentille à la traverse *K M*, ces tiges s'allongent toutes de haut en bas.

Les tiges de laiton 2 et 8 sont fixées à la traverse *N R* ; 4 et 6 à la traverse *O P*, ces tiges s'allongent de bas en haut.

En conséquence, pour que la longueur du pendule soit constante, il faut que l'allongement des tiges de cuivre relève constamment la lentille juste de la même quantité dont l'allongement des tiges d'acier tend à l'abaisser.

73. Dilatation apparente et dilatation absolue des liquides ; coefficient de dilatation (défin.).

Dans les liquides, il n'y a lieu d'observer que la dilatation cubique. En outre, comme on ne peut les maintenir que dans des vases dont ils prennent la forme, en restant en contact avec les parois, leur dilatation ne se manifeste que par le déplacement de leur surface libre, et les parois elles-mêmes se resserrant ou se développant par les effets du calorique, il importe donc de distinguer, pour les liquides, la *dilatation apparente* de la *dilatation absolue ou réelle.*

La *dilatation apparente* est l'accroissement de volume que prend un liquide dans une enveloppe qui se dilate moins que lui. Ex. : dans les thermomètres.

La *dilatation absolue* est l'augmentation réelle de volume, abstraction faite de toute dilatation de l'enveloppe, c'est-à-dire qu'elle doit être considérée comme égale à la somme de la dilatation apparente de ce liquide et de celle de l'enveloppe dans laquelle il est contenu ; d'après cela, la dilatation apparente serait elle-même plus petite que la dilatation absolue de toute celle de l'enveloppe.

De même que pour les solides, on nomme *coefficient de*

dilatation d'un liquide l'accroissement que prend l'unité de volume lorsque la température s'élève de zéro à 1 degré, mais alors on distingue le *coefficient de dilatation absolue* et le *coefficient de dilatation apparente.*

74. Correction de la hauteur barométrique relative à la température. (Dém.).

Pour que les indications du baromètre soient comparables entre elles, en différents lieux et à différentes saisons, il faut toujours ramener la colonne de mercure à une température constante qui est celle de la glace fondante ; ce que l'on fait par le calcul. Ex. :

Soit H = la hauteur du baromètre à t degrés.
" h = " " à zéro.
" d = la densité du mercure à zéro.
" d' = " " à t degrés.

On sait (33-4) que les hauteurs H et h sont en raison inverse des densités d et d', c'est-à-dire qu'on a

$$\frac{h}{H} = \frac{d'}{d} \qquad [1]$$

Mais si l'on représente par 1 le volume du mercure à zéro, son volume à t degrés le sera par $1 + dt$ (d étant le coefficient de dilatation absolue du mercure). Or comme le rapport des volumes 1 et $1 + d\,t$ est égal au rapport inverse des densités d et d' (puisqu'un corps (71 note 3) s'échauffant de zéro à t degrés, sa densité, et par suite son poids, à volume égal, varient en raison inverse du binôme de dilatation $1 + D\,t$) c'est-à-dire qu'on a

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + d\,t} \qquad [2]$$

Ceci posé, des égalités [1] et [2] on tire, à cause de la relation commune $\frac{d'}{d}$.

$$\frac{h}{H} = \frac{1}{1 + d\,t}$$

d'où

$$h = \frac{H}{1 + d\,t}$$

et en remplaçant d par la valeur $\frac{1}{5550}$, coefficient de dilatation absolue du mercure, on a

$$h = \frac{H}{\frac{1 + t}{5550}} = \frac{H + 5550}{5550 + t} \qquad [3]$$

Ex. d'application de la formule [3]. Supposons la température de 25 degrés et la hauteur de baromètre 0.75, calculons sa hauteur à zéro.

Dans la formule [3] remplaçons les lettres par les chiffres et nous aurons

$$h = \frac{0.75 + 5550}{5550 + 25} = \frac{4162.5}{5575} = 0\text{m. } 746$$

la hauteur de la colonne de mercure à zéro serait de 0 mètre, 746 millimètres :

Dans la formule [3] on a négligé la dilatation de l'échelle du baromètre. Pour faire cette correction, on a vu (71, note 2) qu'il faut multiplier le nombre n de divisions observé sur l'échelle par le binôme de dilatation $(1 + K\,t)$. La vraie hauteur du baromètre ramenée à zéro serait donc

$$h = \frac{H\,(1 + K\,t)}{1 + d\,t} \text{ ou } h = \frac{H \times 5550\,(1 + K\,t)}{5550 + t}$$

K représentant le coefficient de dilatation linéaire de l'échelle.

Note.—Coefficient de dilatation du verre. Sachant que la dilatation absolue d'un liquide est égale à sa dilatation apparente, augmentée de la dilatation de l'enveloppe, on a obtenu le coefficient de dilatation cubique du verre en prenant la différence entre le coefficient de la dilatation absolue du mercure et celui de sa dilatation apparente, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation cubique du verre égale

$$\frac{1}{38671} = 0{,}00002585.$$

$$\text{Coefficient de dilatation absolue du mercure} = \frac{1}{5550}$$

$$\text{Cofficient de dilatation apparente du mercure } \frac{1}{6480}$$

d'où, en soustrayant la seconde fraction de la première, on a :

$$\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38671} = 0{,}00002585$$

0,00002585 = Coefficient de dilatation du verre.

75. Maximum de densité de l'eau.

L'eau offre, dans sa dilatation, une particularité remarquable. Si, la prenant à 0 degré, on élève progressivement sa température, son volume diminue jusqu'à 4 degrés ; à partir de ce point, il augmente comme les autres liquides.

C'est donc à 4 degrés qu'existe le minimum de volume, autrement dit le maximum de contraction, et conséquemment le maximum de densité de l'eau.

76. Dilatation des gaz, loi approchée pour tous les gaz, (énoncé et valeur du coefficient de dilatation).

Les gaz sont les corps dont le volume est le plus sensible aux influences de température et de pression, c'est-

à-dire que ce sont les corps les plus dilatables et ceux dont la dilatation présente le plus de régularité.

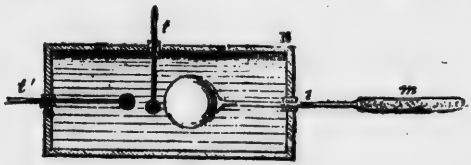
On prend pour coefficient de dilatation des gaz, comme pour les solides et les liquides, l'accroissement de l'unité de volume de zéro à 1 degré et on trouve que ces coefficients varient de quantités extrêmement petites.

Lois de Gay-Lussac.—1° Tous les gaz se dilatent uniformément entre 0 degré et 100 degrés.

2°. Tous les gaz ont le même coefficient de dilatation qui est égal à 0,00375 ou $\frac{1}{267}$

3°. La dilatation des gaz est indépendante de la pression extérieure.

Expérience de Gay-Lussac.—Une caisse rectangulaire *N* en cuivre ou en fer-blanc (fig. 53), placée sur un fourneau, contient deux thermomètres *t* et *t'* dont les tubes



(Fig. 53).

traversent les parois de la caisse et les dépassent à l'extérieur, de manière à rendre les indications visibles. Dans la caisse se trouve fixé un tube thermométrique muni, dans sa tige, d'un index de mercure *i* et ayant un réservoir suffisamment volumineux. On enfonce ce tube jusqu'à l'index afin que tout le gaz soit soumis à la température voulue. Auparavant, on a eu soin de diviser la tige en parties d'égales capacités et de chercher le rapport de l'une des divisions à la capacité du réservoir, c'est-à-dire de savoir combien le réservoir pouvait contenir de divisions.

Si on remplit la caisse de glace fondante, l'index se rapproche du réservoir et s'arrête à un certain point qui est le zéro du thermomètre à air ainsi formé, et qui permet de calculer le volume de l'air à cette température. Si, alors, on remplace la glace par de l'eau bouillante, l'index marchant en sens contraire on note le point où il s'arrête de nouveau et on a ainsi le volume qui a pris l'air à la température donnée par les thermomètres et à la pression marquée par le baromètre dans le même moment.

Calcul de coefficient de dilatation de l'air.—En supposant que la hauteur barométrique soit restée la même et négligeant la dilatation du verre nous aurons :

Soit V_0 le volume d'air contenu dans l'appareil à zéro, V', ce que devient ce volume à t degrés température du bain ; $V'-V_0$ représente évidemment l'accroissement total du volume d'air Vo lorsqu'il s'échauffe de zéro à t degrés. L'accroissement de volume pour un seul degré et pour une seule unité de volume est donc $V' - Vo$ divisé par t et par V_0, c'est-à-dire $\frac{V' - V_0}{V_0 = t}$

et en représentant par a le coefficient de dilatation de l'air, nous aurons :

$$a = \frac{V' - V_0}{V_0 \times t} \quad [1]$$

a coefficient que l'on trouve égal à la valeur :

$$0{,}00375 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{267}$$

de la formule [1] on tire pour la valeur de V'

$$V' = V_0 + a\ V_0\ t$$

d'où, dans le second membre, en mettant Vo en facteur commun, nous aurons $V' = V_0\ (1 + a\ t)$ [2]

de la formule [2] nous tirons pour la valeur de V_0

$$V_0 = \frac{V'}{1 + a\ t} \quad [3]$$

77. Poids spécifiques des gaz par rapport à l'air. (Comment on les détermine et indication des corrections à faire).

La densité d'un gaz ou poids spécifique est le rapport entre le poids du volume de ce gaz et le poids d'un égal volume d'air étant tous les deux à zéro et à la pression 0.760mm.

Procédé général.—Le fond de la question revient, d'après la définition même, à résoudre la valeur $d = \frac{x}{y}$ dans laquelle d est la densité cherchée, x et y sont les poids relatifs d'un égal volume du gaz considéré et de l'air.

Le procédé consiste donc à peser successivement un même ballon rempli du gaz dont on veut mesurer la densité, puis vidé, puis rempli d'air, puis vidé de nouveau ; et à tenir compte de la pression atmosphérique et de la température.

Appelons P le poids du ballon plein de gaz dont on cherche la densité.

" p le poids du ballon vide.

" H la hauteur barométrique au moment de l'opération.

" t la température observée au moment de l'opération.

" e la force élastique de la faible portion de gaz qui reste dans le ballon au moment où l'on cesse de faire le vide, force élastique ou pression qu'on observe à l'aide de l'éprouvette de la machine pneumatique.

D'après cela $P-p$ est donc le poids du gaz contenu dans le ballon à la température t et à la pression $H-E$.

Pour ramener ce poids à la pression 0m. 760 et à la température de zéro nous aurons, d'après la loi de Mariotte,

"La densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte." En appelant X la densité se rapportant à 0m. 760.

$$\frac{X}{P - p} = \frac{0.760}{H - E}$$

d'où

$$X = (P - p)\frac{0.760}{H - E}$$ la température étant toujours t,

or, si cette température devient zéro, le coefficient du ballon diminue dans le rapport de $1 + \delta t$ à 1, tandis que le poids du gaz augmente dans le rapport de 1 à $1 + a t$. Donc le poids du gaz contenu dans le ballon à zéro et à la pression $0^m.760$ est

$$x = (P - p)\frac{0.760}{H - E} \times \frac{1 + a t}{1 + \delta t} \quad [1]$$

a représente le coefficient de dilatation des gaz.
δ " " " cubique du verre.

Cette formule [1] représente donc le poids du gaz ramené à la pression 0.760 et à zéro.

Pour l'air nous aurons une formule analogue.

En appelant P' le poids du ballon plein d'air.
En appelant p' " " vide.
En appelant H' la hauteur barométrique au moment de l'opération.
En appelant t' la température observée au moment de l'opération.
En appelant e' la force élastique de la faible portion d'air qui reste dans le ballon au moment où l'on cesse de faire le vide, force élastique ou pression qu'on observe à l'aide de l'éprouvette de la machine pneumatique.

D'après cela, $P' - p'$ est donc le poids de l'air contenu dans le ballon à la température t' et à la pression $H' - e$

d'où nous aurons, en passant par le même raisonnement que pour obtenir l'expression [1],

$$Y = (P^1 - p^1)\frac{0.760}{H' - E} \times \frac{1 + a' t'}{1 + \delta t'} \quad [2]$$

alors, divisant la formule [1] par la formule [2], nous aurons pour la densité cherchée

$$D = \frac{x}{y} = \frac{(P - p)(H' - E)(1 + a t)(1 + \delta t')}{(P' - p')(H - E)(1 + a' t')(1 + \delta t)}$$

valeur qui est indépendante du volume du ballon.

Maintenant, si la température et la pression ne varient pas et que les coefficients des gaz soient égaux, c'est-à-dire $H = H'$ $t = t'$ et $\alpha = \alpha'$, nous aurons

$$D = \frac{P - p}{P' - p'}$$

Remarque.—Connaissant le poids du litre d'air (1 gr 293) et la densité d'un gaz, on peut calculer le poids P d'un volume V de ce gaz dans les conditions normales de température et de pression. On a $P = V\,a\,D$; car le produit $a\,D$ représente, par définition, le poids normal du litre de ce gaz. Ex. : soit la densité de l'Hydrogène $= 0.0693$; nous voulons savoir quel sera le poids d'un litre de ce gaz. Dans la formule $P = V\,a\,D$, remplaçons les lettres par leur valeur numérique, nous aurons :

$P = 1$ litre $\times$ 1.293 $\times$ 0.0693 $=$ 0.089 milligrammes dans la formule la lettre $a = 1.293$, poids d'un litre d'air.

78. Fusion (Déf.) ; Enoncé des lois.—Chaleur latente ou chaleur de fusion.—Dissolution. (Déf.).

(*a*). *Fusion ; énoncé des lois.* —Lorsque certains corps solides sont soumis à une élévation suffisante de température, ils fondent, c'est-à-dire qu'ils passent de l'état solide à l'état liquide.

Lois.—1°. Sous une pression constante, tout corps entre

en fusion à une température déterminée et invariable pour chaque substance qu'on appelle point de fusion.

2°. Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment que la fusion commence, la température cesse de s'élever et reste égale à celle du point de fusion jusqu'à ce que celle-ci soit complète.

(*b*). *Chaleur latente ou chaleur de fusion.* — D'après la 2ème loi, toute la chaleur communiquée pendant la fusion disparaît donc comme chaleur sensible, d'où l'on conclut qu'elle est consommée par le travail interne nécessaire pour obtenir l'état moléculaire qui constitue la fluidité. Cette quantité de chaleur transformée en travail a été désignée sous le nom de *chaleur latente* ou *chaleur de fusion.*

Ex. : Si l'on prend un kilogramme d'eau à la température de 79° degrés et 1 kilo. d'eau à zéro degré et qu'on les mêle, le thermomètre, plongé dans ce mélange, indique 39° 5, c'est-à-dire la moyenne entre les températures des deux liquides mélangés à poids égaux. Mais le résultat sera tout autre si, au lieu d'employer de l'eau liquide à zéro degré, on emploie de la glace, c'est-à-dire de l'eau présentant toujours la température de zéro degré, mais offrant la forme solide.

Quand on mêle en effet, 1 kilo. de glace à zéro degré et 1 kil. d'eau chauffée à 79 degrés, on observe que la glace se fond et que le mélange tout entier devient liquide. Mais si l'on prend la température du mélange, on reconnaît qu'au lieu d'être, comme dans l'expérience précédente, la moyenne entre les deux températures, elle est seulement de zéro degré. Les 79 degrés de chaleur que renfermait le kilogramme d'eau ont ainsi disparu sans laisser de traces ; seulement la glace s'est fondue et le mélange a pris la forme liquide. Que conclure de ce fait ? C'est que le kilo de glace a dû absorber, pour se fondre, les 79 degrés de chaleur qui ont disparu, et que cette quantité de calorique a été employée à

déterminer sa fusion, puisque la température n'a pas varié. En d'autres termes, 1 kilo. d'eau liquide diffère d'un même poids d'eau solidifiée en ce qu'elle contient 79 degrés de chaleur de plus que cette dernière.

On voit par là que, sans changer de température et uniquement pour se fondre, 1 kilo. de glace absorbe une quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 79 degrés 1 kil. d'eau.

Cette quantité de chaleur, qui n'est pas appréciable à nos organes ni accusée par le thermomètre, est *latente*. C'est pourquoi, Black, physicien anglais, professeur à l'université de Glasgow, et qui créa la théorie du calorique latent (1762), donna le nom de *chaleur latente* à cette quantité de calorique qui n'affecte pas le thermomètre et qui est nécessaire pour provoquer le changement d'état des corps. Quand l'eau se congèle, elle met en liberté sa chaleur latente. On peut, en effet, constater, par l'expérience, qu'en se solidifiant 1 kilo d'eau à zéro abandonne 79 degrés de chaleur.

On appelle donc, en général, *chaleur latente* ou *chaleur de fusion*, la quantité de chaleur nécessaire pour fondre *l'unité de poids* d'un solide *sans élévation de température*.

Chaque substance a une chaleur de fusion propre, qu'on peut déterminer par expérience.

(*c*). *Dissolution.* — Un corps se dissout lorsqu'il se liquéfie par suite de l'affinité qui s'exerce entre ses molécules et celles d'un liquide. Ex. : le sucre se dissout dans l'eau.

Ce phénomène est un nouveau mode de fusion, aussi l'appelle-t-on *fusion aqueuse*.

Pendant la dissolution comme pendant la fusion, il y a disparition de chaleur ; cependant, quand il y a, au contraire, dégagement de chaleur, c'est que la dissolution est en même temps accompagnée de la combinaison

du corps dissous avec le liquide, phénomène chimique qui s'opère avec dégagement de chaleur.

79. Solidification. (Défin.) : Enoncé des lois.

La solidification est le passage de l'état liquide à l'état solide.

Lois.—1°. La solidification se produit, pour chaque corps, à une température fixe, qui est précisément celle de la fusion.

2°. Du moment que la solidification commence, jusqu'à ce qu'elle soit complète, la température reste constante.

La chaleur, qui devient sensible pendant la solidification, est exactement la même que celle qui disparaît pendant la fusion.

80. Vaporisation et vapeurs ; force élastique des vapeurs. (Déf.).

Les vapeurs sont des fluides aériformes provenant du changement d'état des liquides. Ce phénomène se désigne sous le nom de *vaporisation.*

Il y a vaporisation par *évaporation* quand les vapeurs se forment à la surface d'un liquide abandonné à lui-même.

Il y a vaporisation par *ébullition* quand les vapeurs sont produites rapidement dans la masse même d'un liquide sous l'influence de la chaleur.

Un liquide est dit *volatil* quand il se réduit assez rapidement de lui-même en vapeurs à la température ordinaire ou à des températures plus élevées. Ex. : alcool, éther.

Les liquides *fixes* sont ceux qui ne donnent de vapeurs à aucune température. Ex. : huiles, graisses.

Comme les gaz, les vapeurs ont une force élastique exerçant sur les parois des vases qui les contiennent des pressions plus ou moins grandes.

Lois sur la formation des vapeurs.

1°. La pression ralentit la vaporisation.

2°. Dans le vide, les liquides se vaporisent instantanément.

3° A température égale, les vapeurs de liquides différents ne possèdent pas la même tension.

81. Différence entre vapeurs saturantes et vapeurs non saturantes.

Si, dans le tube d'un baromètre, on introduit un liquide volatil, tel que l'éther, on remarque qu'à l'instant même où l'éther pénètre dans le vide barométrique, le niveau du mercure s'abaisse. Ce n'est pas le poids du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'est qu'une fraction très petite de celui du mercure déplacé, mais une production instantanée de vapeur, dont la force élastique a refoulé la colonne mercurielle. Si la quantité d'éther introduite en est très petite, elle se vaporise instantanément d'une manière complète et la colonne de mercure n'atteint pas la plus grande dépression qu'elle est susceptible d'éprouver ; car si l'on introduit de nouveau une très petite quantité d'éther, on voit la dépression augmenter, et si l'on continue ainsi il vient un moment où l'éther introduit cesse de se vaporiser et reste à l'état liquide, *si la température ne varie pas.* Il y a donc, pour une température déterminée, une limite à la vaporisation dans un espace clos. C'est ce qu'on exprime en disant que cet espace est alors *saturé* et que la vapeur qui le remplit est une *vapeur saturante* ou *saturée.* Nous voyons donc que le caractère *extérieur* de la saturation, c'est la présence d'un *excès de liquide* au contact de l'atmosphère gazeuse qui, dans le cas présent, est une atmosphère gazeuse éthérée. On dit aussi que la vapeur d'éther a atteint son *maximum de tension* ou sa *tension maximum*, et si l'on fait varier le volume occupé par la vapeur, la tension maximum reste la même, pourvu que la température soit constante et

qu'il y ait toujours un excès de liquide ; d'après cela, la *tension maximum* augmente avec la température ; mais pour une température donnée, *elle est indépendante de la pression.*

D'après ce qui vient d'être démontré, les vapeurs se présentent sous deux états bien distincts, suivant qu'elles sont ou non saturées. Dans le premier état, celui de la saturation, celui où elles sont en contact avec leur liquide, elles diffèrent complètement des gaz, puisque, pour une température donnée, elles ne peuvent être ni comprimées ni dilatées, leur force élastique et leur densité restant constantes, tandis qu'au contraire les vapeurs non saturées, non en contact avec leur liquide générateur, sont comparables aux gaz dont elles possèdent toutes les propriétés et sont soumises à la loi de Mariotte, c'est-à-dire que leur force élastique varie avec le volume qu'on leur fait occuper.

Dans notre exemple nous avons pris l'éther comme liquide volatil ; nous aurions aussi bien pu prendre l'eau, l'alcool, ou tout autre liquide susceptible de se volatiliser ; mais leurs tensions de vapeurs eussent été différentes (troisième loi sur la formation des vapeurs (80).

82. Principe de la méthode de Regnault pour déterminer la tension des vapeurs au-dessus et au-dessous de 100° C.—Comment il l'a appliqué.

(*a*). *Principe de la méthode, etc....* — Cette méthode consiste à faire bouillir de l'eau dans un vase clos, sous une pression connue d'avance et à mesurer la température d'ébullition. Elle est fondée sur ce fait d'expérience, que lorsqu'un liquide entre en ébullition, la force élastique de la vapeur qui se dégage est précisément égale à la pression que supporte le liquide.

(*b*). *Comment il l'a appliqué.* — Pour son application, on se sert d'un vase de cuivre hermétiquement fermé.

rempli d'eau jusqu'au tiers environ et portant quatre thermomètres qui, traversant le couvercle, plongent deux dans les premières couches du liquide et les deux autres dans les couches inférieures, ce vase se trouve en communication avec le goulot d'un ballon de verre rempli d'air ; de la partie supérieure du ballon portant deux tubes, l'un communique avec un manomètre à air libre et l'autre avec une machine pneumatique, ou avec une pompe foulante, suivant que l'on veut raréfier l'air ou le comprimer.

Pour la détermination de la tension au-dessous de 100 degrés, on raréfie l'air dans le ballon et par suite dans le vase au moyen de la machine pneumatique. Alors, chauffant doucement le vase, l'eau entrera en ébullition à une température d'autant plus au-dessous de 100 degrés que l'air a été plus raréfié, c'est-à-dire que la pression est plus faible, alors la pression indiquée par le manomètre, au moment de la raréfaction de l'air, ne varie pas pendant l'ébullition ; puis, consultant le manomètre et les thermomètres, on détermine la tension de vapeur à une température connue.

Pour, au contraire, prendre la tension de la vapeur au-dessus de 100 degré, on comprime de l'air dans le vase et l'ébullition est d'autant plus retardée que la compression est plus forte, et faisant les mêmes observations que précédemment on trouve les tensions de vapeur à une température connue.

Ex. : à 100 degrés la tension de vapeur d'eau fait équilibre à une colonne de mercure de 0m, 760mm, tandis qu'à 90 degrés la colonne de mercure n'est plus que de 0m, 525mm 45, et à 120 degrés elle est de 1m, 520, c'est-à-dire égale à 2 atmosphères, l'eau à 120 degrés fait donc équilibre à deux atmosphères.

83. Evaporation. (Déf. et causes qui l'accélèrent).

On appelle évaporation une production lente de vapeurs à la surface d'un liquide.

Quatre causes influent sur sa rapidité.

1°. La température qui l'accélère.

2°. La quantité de vapeur du même liquide répandue déjà dans l'atmosphère ambiante.

3°. Le renouvellement de l'atmosphère.

4°. L'étendue de la surface d'évaporation.

84. Ebullition. (Déf.) ; énoncé des lois.— Chaleur de vaporisation.

(a). Ebullition ; énoncé des lois.—On appelle *ébullition* le phénomène par lequel un liquide passe rapidement et tumultueusement à l'état de vapeur, sous l'influence de la chaleur ou d'une diminution de pression.

Lois.—1°. La température d'ébullition augmente avec la pression.

2°. Pour une pression donnée, l'ébullition ne commence qu'à une température déterminée, qui varie d'un liquide à un autre, mais qui est toujours la même pour un même liquide, tant qu'il est placé dans les mêmes conditions de pression, de pureté et de contact avec d'autres corps.

3°. Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment que l'ébullition commence, la température du liquide reste stationnaire.

(b). Chaleur de vaporisation. — On appelle ainsi la quantité de chaleur absorbée par l'unité de poids d'un liquide pour passer à l'état de vapeur sans changer de température.

85. Influence de la pression sur la température d'ébullition.— Mesure de la hauteur des montagnes par la température d'ébullition.

(d). Influence de la pression, etc. — L'eau distillée, entrant en ébullition à la température de 100 degrés et sous la pression 0m, 760, indique que sa vapeur a une tension précisément égale à cette pression, d'où l'énoncé

du principe suivant : *Tout liquide entre en ébullition au moment où la tension de sa vapeur égale la pression qu'il supporte.*

D'après cette loi, la pression augmentant ou diminuant, la tension de vapeur, et par conséquent la température nécessaire à l'ébullition doivent croître ou décroître.

Dans le vide absolu, l'eau entrerait en ébullition à zéro.

C'est par la diminution de pression que, sur les hautes montagnes l'eau bout au-dessous de 100 degrés. Ex. : sur le mont Blanc, dont la hauteur au-dessus du niveau de la mer est de 4810m, l'eau entre en ébullition à 82 degrés.

Si, au contraire, la pression augmente, l'ébullition est retardée ; à 2 atmosphères l'eau ne bout qu'à 120°, 6.

(*b*). *Mesure de la hauteur des montagnes, etc.*—La dépendance qui existe entre la température d'ébullition et la pression donne le moyen de mesurer la hauteur des montagnes par le thermomètre appelé *hypsomètre*, instrument dont la tige est graduée de 80 degrés à 100 degrés ; des tables donnent la tension de la vapeur d'eau pour chaque dixième de degré et on trouve des nombres qui représentent en millimètres de mercure la force élastique de la vapeur au moment où elle se dégage au sommet et au pied de la montagne, et par suite la pression atmosphérique supportée par l'eau en ébullition aux deux stations. Connaissant ainsi la hauteur du baromètre au sommet de la montagne et à sa base, on peut en calculer la hauteur d'après la formule suivante :

$$D = 1000 \left(\frac{H - h}{H + h}\right) \left(1 + \frac{2\,T + t}{1000}\right)$$

dans laquelle D désigne la distance verticale entre le sommet et la base de la montagne ; H la hauteur du baromètre au pied de la montagne et h la hauteur au

sommet; T la température de l'air au pied et t au sommet.

86. Production des vapeurs en vase clos.— Marmite de Papin.

(*a*). *Production de vapeurs en vase clos.*—Les vapeurs se produisant dans un espace indéfini peuvent se répandre librement, et ce n'est qu'à cette condition qu'il peut y avoir ébullition ; mais en vase clos, les vapeurs qui se produisent ne trouvant aucune issue, leur tension et leur densité croissent de plus en plus avec la température, mais le dégagement rapide qui constitue l'ébullition est impossible ; en conséquence dans un vase ouvert la température d'un liquide ne peut dépasser celle de son ébullition et dans un vase clos, au contraire, elle peut s'élever beaucoup au delà.

(*b*). *Marmite de Papin.*—Cet appareil consiste en un vase cylindrique de bronze à parois très résistantes, fermé par un couvercle maintenu solidement à l'aide d'une vis de pression. Une soupape chargée d'un poids est pratiquée dans le couvercle et prévient toute explosion. La marmite est remplie d'eau aux deux tiers et quand l'appareil est porté à une haute température, on ouvre la soupape et la vapeur sort violemment et avec bruit en s'élançant à une hauteur de plusieurs mètres.

La marmite de Papin, appelée aussi *Digateur*, est utilisée pour augmenter l'action dissolvante des liquides en les portant à une température supérieure à celle de leur point d'ébullition.

87. Etat sphéroïdal des liquides. (Notion succincte).

Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables, le liquide ne s'étale pas sur la surface métallique et ne la mouille pas, comme il le ferait à la température ordi-

naire, mais il prend la forme d'un globule aplati qu'on exprime en disant que le liquide passe à *l'état sphéroïdal;* dans ces conditions, le liquide est animé d'un mouvement gyratoire et rapide sur la surface métallique incandescente, et non seulement il n'entre pas en ébullition, mais il se vaporise 50 fois plus lentement que s'il y avait ébullition, et si la surface se refroidit, il vient un moment qu'elle n'est plus assez chaude pour maintenir le liquide à l'état sphéroïdal, alors la surface est mouillée par le liquide et une ébullition violente se manifeste tout à coup.

Tous les liquides peuvent prendre l'état sphéroïdal, et dans cet état, il n'y a point contact entre le liquide et le corps chaud.

Pour expliquer ce phénomène, on admet que le globule liquide est soutenu à distance du vase par la tension de la vapeur qui se produit à sa surface, en sorte que le liquide, n'étant pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement, ne se vaporise que lentement.

88. Hygrométrie. (Déf.)—Etat hygrométrique. (Déf.). —Hygromètre à condensation.—Psychromètre.

(*a*). *Hygrométrie.* — L'hygrométrie est la partie de la physique qui a pour objet de déterminer la proportion de vapeur d'eau contenue soit dans l'atmosphère, soit dans un volume d'air déterminé.

(*b*). *Etat hygrométrique.* — L'état hygrométrique est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau que l'air contient et celle qu'il contiendrait s'il était saturé à la même température.

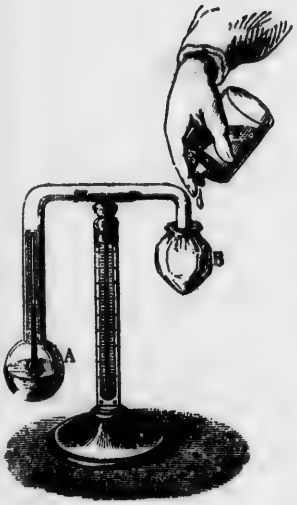
(*c*). *Hygromètre à condensation.*—Cet hygromètre est basé sur le principe suivant, si on refroidit progressivement un corps placé dans une atmosphère non saturée,

il arrive un moment où l'air, qui est en contact avec le corps et qui se refroidit en même temps, atteint la température où la vapeur d'eau qu'il contient devient saturante. Cette vapeur se condense alors et se dépose en buée ou rosée à la surface du corps refroidi ; un thermomètre indique sur cet instant la température du *point de rosée*, c'est-à-dire la température de saturation de la couche d'air ambiante. Supposons que la température de l'air, dans les points où il n'est pas influencé par le corps qui se refroidi, soit T, et supposons, d'un autre côté, qu'il faille abaisser la température de cet air à t pour que la vapeur devienne saturante, c'est-à-dire pour que le point de rosée se forme, nous aurons, d'après la définition de l'état hygrométrique et en remplaçant les poids de vapeur d'eau par leurs forces élastiques correspondantes, (application de la loi de Mariotte aux vapeurs non saturées comme aux gaz, d'où il résulte que, pour la même température et pour le même volume, le poids de la vapeur dans un espace non saturé est proportionnel à la pression qu'elle supporte ou, ce qui est la même chose, à la force élastique qu'elle possède) ; si F représente la force élastique maximum de la vapeur d'eau à T; et si f représente la force élastique maximum de la vapeur d'eau à t, l'état hygrométrique E de l'air sera donné, d'après définition, par la relation

$$E = \frac{f}{F}$$

Les deux valeurs f et F sont données l'une et l'autre par la table des forces élastiques maximum de la vapeur d'eau, et le principe de l'opération consiste à déterminer avec exactitude la température t à laquelle se forme le point de rosée correspondant à f.

L'hygromètre à condensation de Daniel se compose



(Fig. 54).

(fig. 54) d'un tube de verre deux fois recourbé et à branches inégales terminée chacune par une boule. La boule *A* de la grande branche est en verre bleu et c'est sur elle que doit s'observer le dépôt de rosée ; elle contient de l'éther dans lequel plonge le thermomètre *t* qui doit donner la température de la couche d'air refroidie.

L'intérieur de l'appareil est complètement purgé d'air, ce qui permet à l'éther, ne supportant d'autre pression que sa propre vapeur, de pouvoir entrer en ébullition et distiller dès que celle-ci est condensée par refroidissement. L'autre boule *B* est recouverte de mousseline et sur le pied de l'instrument se trouve le thermomètre *T*, destiné à donner la température de l'atmosphère non refroidie : Pour opérer, on refroidit la boule *B* en versant de l'éther sur la mousseline ; cet éther, en se vaporisant, condense la vapeur d'éther de la boule *B* et l'éther, placé dans l'intérieur de la boule *A*, supportant une pression de plus en plus faible, s'évapore de plus en plus rapidement et produit de plus en plus de froid ; le thermomètre *t* s'abaisse, et on observe le moment où la boule *A* se recouvre de buée ; alors, notant la température extérieure *T* et intérieure *t* on peut appliquer la formule $E = \frac{f}{F}$

(*d*). *Psychromètre.*—Cet appareil fait connaître indirectement le degré d'humidité de l'atmosphère et repose sur ce principe, que le froid qu'éprouve un thermomètre, dont le réservoir est entouré d'un linge mouillé, dépend de la rapidité plus ou moins grande de l'évaporation de l'eau, laquelle dépend, à son tour, du degré plus ou moins grand d'humidité de l'air. Cet appareil se compose de deux thermomètres, le réservoir de l'un deux est enveloppé d'une mousseline humectée automatiquement, l'évaporation qui se produit fait baisser ce dernier et la différence des deux thermomètres est d'autant plus grande que l'évaporation est plus rapide et, par suite, que l'air est plus éloigné de son point de saturation.

89. Chaleurs spécifiques, calorie. (Déf.).— Valeur ou mesure de la chaleur sensible absorbée ou perdue par les corps. (Dém.). — Méthode des mélanges. —Mesure de la chaleur de fusion.— Mesure de la chaleur de vaporisation.

La *calorimétrie* a pour objet de mesurer la quantité de chaleur que perdent ou gagnent les corps lorsque leur température s'abaisse ou s'élève d'un nombre de degrés connu ou lorsqu'ils changent d'état.

(*a*). *Chaleurs spécifiques. Calorie.*—Le corps choisi est l'eau et l'on est convenu de prendre, pour *unité de chaleur* ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau pure (*grande calorie*) ou de 1 gramme d'eau pure (*petite calorie*).

On appelle *chaleur spécifique* ou *capacité calorifique* d'un corps, la quantité de chaleur qu'il gagne lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, comparativement à celle que gagne, dans le même cas, un égal poids d'eau. Comme nous l'avons dit, la chaleur spécifique de l'eau est égale à l'unité, et elle est la plus grande de toutes

celles que nous connaissons ; aussi les chaleurs spécifiques des autres corps sont-elles exprimées par des fractions.

Tous les corps n'ont pas même chaleur spécifique.

Ex. : 1 kilogramme de mercure à 100 degrés, mélangé avec 1 kilogramme d'eau à zéro, donne un mélange à 3 degrés, c'est-à-dire que le mercure s'étant refroidi de 97 degrés, sa quantité de chaleur perdue n'a échauffé que de 3 degrés le même poids d'eau. L'eau prend donc, à poids égal, environ 32 fois plus de chaleur ($\frac{97}{3} = 32,3$) que le mercure pour une même élévation de température.

(*b*). *Valeur ou mesure de la chaleur sensible absorbée ou perdue par les corps.*

Soit $m =$ le poids d'un corps en kilogrammes.

" $c =$ sa chaleur spécifique.

" $t =$ sa température.

La quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré 1 kilogramme d'eau étant prise pour unité, il faut m de ces unités pour élever de zéro à 1 degré un poids d'eau de m kilogrammes ; et pour élever ce dernier poids de zéro à t degrés, il faut t fois plus, c'est-à-dire mt. Puisque telle est la quantité de chaleur nécessaire pour porter de zéro à t degrés m kilogrammes d'eau, dont la chaleur spécifique est 1, pour un corps de même poids dont la chaleur spécifique est c, il faut c fois $m\,t$ ou $m\,t\,c$. Donc, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, la quantité de chaleur qu'il absorbe peut se représenter par le produit obtenu en multipliant son poids par le nombre de degrés dont il s'échauffe et par sa chaleur spécifique.

Si le corps s'échauffe de t à θ degrés, la chaleur absorbée sera représentée par la formule :

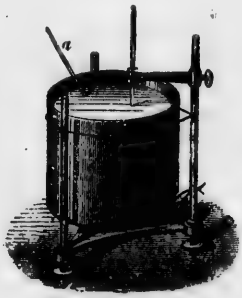
$$m\ c\ (\theta - t) = \text{chaleur absorbée.}$$

Si, au contraire, le corps se refroidit de t à θ degrés, la chaleur perdue sera représentée par la formule :

$$m\ c\ (t - \theta) = \text{chaleur perdue}$$

ces deux formules sont très importantes, car ce sont elles qui permettront de résoudre tous les problèmes sur les chaleurs spécifiques.

(c). *Méthode des mélanges.* — Lorsqu'on mélange deux corps de températures inégales, la température tend aussitôt à devenir uniforme, et la quantité de chaleur gagnée par l'un est égale à celle que l'autre a perdue ; de la chaleur que l'un des corps cède à l'autre, on déduit alors sa chaleur spécifique.



(Fig. 55).

Si on plonge dans une masse d'eau froide un corps dont la température soit supérieure à celle de l'eau, l'équilibre calorifique tendra à s'établir et il arrivera un moment où la température du liquide et celle du corps introduit seront identiques.

L'appareil qui sert pour cette démonstration est le *calorimètre à eau* (fig. 55) qui se compose d'un vase de laiton à parois minces et polies, soutenu par des fils de soie pour éviter la déperdition de la chaleur. Ce vase est rempli d'eau dans laquelle plonge un thermomètre B et une baguette de verre A pour agiter le liquide pendant qu'il s'échauffe.

Soit M le poids du corps soumis à l'expérience.
" T sa température au moment de l'immersion.
" C sa chaleur spécifique.

Soit m le poids de l'eau froide.
" t la température de l'eau.
" m' le poids du vase qui contient l'eau (le calorimètre).
" c' sa chaleur spécifique.
" t la température du vase qui est évidemment celle de l'eau.
" θ la température finale du mélange.

Le corps chaud étant plongé dans l'eau, la température de l'eau s'élève et nous donne θ ; le corps s'est donc refroidi de $(T-\theta)$ et la quantité de chaleur qu'il a perdue est égale à $M\ c\ (T-\theta)$.

L'eau et le vase, au contraire, se sont échauffés d'un nombre de degrés égal à $(\theta-t)$ et ont absorbé respectivement des quantités de chaleur égales à $m\ (\theta-t)$ et à $m'\ c'\ (\theta-t)$, la chaleur spécifique de l'eau étant égale à l'unité.

Or, la quantité de chaleur cédée par le corps chaud est évidemment égale à la somme des quantités de chaleur absorbées par l'eau et par le vase, nous aurons donc l'équation :

$$M\,c\,(T-\theta) = m\,(\theta - t) + m'\,c'\,(\theta - t) \quad [1]$$

De cette équation il est facile de tirer la valeur de c, celle de C' étant connue. Mais si C', chaleur spécifique du vase n'était pas connue, il faudrait la déterminer en premier lieu ; pour cela on plonge dans l'eau un corps chaud de même matière que le vase qui, par conséquent, a la même chaleur spécifique que lui. Alors l'équation [1] devient :

$$M\,c'\,(T-\theta) = m\,(\theta - t) + m'\,c'\,(\theta - t) \quad [2]$$

et en la résolvant par rapport à C', on trouve

$$C' = \frac{M\,(\theta - t)}{M\,(T-\theta) \quad M'\,(\theta - t)}$$

La chaleur spécifique du vase étant connue, pour ré-

soudre l'équation [1] trouvée plus haut, on met dans le second membre $(\theta - t)$ en facteur commun et il vient

$$M\,c\,(T - \theta) = (m + m'\,c')\,(\theta - t) \quad [3]$$

divisant par $M\,(T - \theta)$ nous aurons pour valeur de c

$$c = \frac{(m + m'\,c')\,(\theta - t)}{M\,(T - \theta)} \quad [4]$$

On écrit souvent cette dernière valeur sous la forme suivante :

$$c = \frac{(M + \mu)\,(\theta - t)}{M\,(T - \theta)} \quad [5]$$

en faisant dans la formule [4] $m'\,c' = \mu$; μ est donc le poids d'eau qui prendrait la même quantité de chaleur que le vase, ce qu'on exprime en disant que celui-ci est *réduit en eau.*

(*d*). *Mesure de la chaleur de fusion.* — On appelle *chaleur de fusion* d'un corps solide le nombre de calories nécessaires à 1 kilogramme de ce corps pour passer, sans élévation de température, de l'état solide à l'état liquide.

La chaleur de fusion des corps se détermine par la méthode des mélanges en s'appuyant sur ce principe que, lorsqu'un corps à l'état liquide se solidifie, il restitue une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle qu'il avait absorbée pendant la fusion.

Ex. : Soit à déterminer la chaleur de fusion du plomb.

Soit : M = un poids de ce corps fondu.
" T = la température du plomb fondu.
" m = le poids de la masse d'eau.
" t = sa température.
" c = chaleur spécifique du plomb.

Soit x = chaleur de fusion du plomb (ce que l'on cherche) c'est-à-dire la quantité de chaleur consommée par l'unité de poids pour se fondre, ou encore celle qui paraît au moment de la solidification.

" θ = la température finale que prend l'eau échauffée par le plomb.

L'eau échauffée de t à θ degrés a absorbé une quantité de chaleur représentée par $m\ (\theta - t)$.

Le plomb, en se refroidissant de T à θ, a cédé d'une part une quantité de chaleur égale à $M\ c\ (T - \theta)$; de l'autre, au moment de la solidification il dégage une quantité de chaleur représentée par $M\ X$, c'est-à-dire son poids multiplié par sa chaleur de fusion ; nous pouvons donc dire que la chaleur perdue par le plomb $Mc\ (T - \theta)$, plus la chaleur dégagée pendant la solidification $M\ X$, sont égales à la chaleur absorbée par l'eau $m\ (\theta - t)$, d'où l'égalité suivante :

$$M\ c\ (T - \theta) + M\ x = m\ (\theta - t)$$

d'où

$$X = \frac{m\ (\theta - t) - M\ c\ (T - \theta)}{M}$$

(*e*). *Mesure de la chaleur de vaporisation.*—Les liquides, en se vaporisant, font disparaître une quantité de chaleur considérable, désignée sous le nom de *chaleur d'élasticité* ou de *chaleur de vaporisation.* La *chaleur de vaporisation* d'un liquide est le nombre de calories qu'absorbe 1 kilogramme de ce liquide pour se vaporiser sans augmentation de température.

Une vapeur qui se liquéfie rend libre une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'elle avait absorbée en se formant.

Pour déterminer la chaleur de vaporisation d'un liquide, on fait produire la vapeur dans une cornue où sa température est indiquée par un thermomètre ; cette

vapeur se rend dans un serpentin noyé dans l'eau froide où elle leur cède sa chaleur latente en se condensant. L'eau provenant de la condensation se rend dans un récipient, auquel aboutit le serpentin, et dont on l'extrait à la fin de l'expérience, pour la peser, son poids étant celui de la vapeur qui a circulé dans l'appareil.

Soit M = le poids de la vapeur condensée.
" T = sa température à son entrée dans le serpentin.
" x = sa chaleur de vaporisation.
" m = le poids de l'eau dans laquelle plonge le serpentin, y compris celui du vase, du serpentin, du thermomètre et de l'agitateur réduit en eau.
" t = la température initiale de l'eau.
" θ = la température finale de l'eau quand on arrête l'expérience.

La chaleur cédée par 1 kilogramme de vapeur qui se condense étant x, la chaleur cédée par les M kilogrammes de vapeur par le fait seul de la condensation, est $M\,x$. De plus, indépendamment de toute condensation, le poids d'eau M, se refroidissant de T à θ, perd une quantité de chaleur représentée par $M\,(T\text{-}\theta)$; d'où l'on voit que la quantité totale de chaleur cédée par la vapeur est $M\,x + M\,(T\text{-}\theta)$. D'ailleurs la chaleur gagnée par l'eau, le vase et les accessoires est $m\,(\theta\text{-}t)$, d'où on a

$$M\,x + M\,(T - \theta) = m\,(\theta - t)$$

d'où

$$x = \frac{m\,(\theta - t) - M\,(T - \theta)}{M}$$

On a trouvé, pour chaleur de vaporisation de la vapeur d'eau à 100 degrés, le nombre 540 ; c'est-à-dire que 1 kilogramme d'eau à 100 degrés dépense, pour se vaporiser, la chaleur nécessaire pour élever 540 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré.

90. Conductibilité de la chaleur par les solides, par les liquides et par les gaz. (Notion succincte).

On appelle conductibilité des corps, la propriété qu'ils possèdent, à un degré plus ou moins élevé, de transmettre la chaleur à travers leur masse.

Le pouvoir conducteur peut différer beaucoup d'un corps à l'autre; on les divise en bons et en mauvais conducteurs. Les métaux sont généralement bons conducteurs ; les substances organiques conduisent mal la chaleur.

Les liquides sont de très mauvais conducteurs de la chaleur, et si, sous l'influence de la chaleur, les molécules de la masse liquide finissent par avoir une température uniforme, bien qu'éloignée diversement de la source de chaleur, c'est dû au double courant qui s'établit, l'un ascendant, qui suit l'axe du vase, et l'autre descendant, qui en longe les parois, courants qui sont dus à la dilatation des couches inférieures qui, devenues plus légères, s'élèvent et sont remplacées par les couches supérieures plus froides et plus denses.

Les gaz sont les plus mauvais conducteurs de tous les corps ; dans ces derniers comme dans les liquides, la chaleur se propage par le déplacement même des molécules donnant naissance à des courants intérieurs.

Les physiciens anglais ont caractérisé ce mode de propagation de la chaleur dans les liquides et les gaz par le nom de *convection* qui veut dire transporter, c'est-à-dire le transport des molécules des parties chaudes vers les parties froides ; tandis que dans les solides la chaleur est transmise par un véritable rayonnement de molécule à molécule.

91. Rayonnement ou radiation de la chaleur. (Déf.) ; Enoncé des lois.

(*a*). *Rayonnement ou radiation de la chaleur.* — La chaleur est dite rayonnante quand elle se propage d'un corps à un autre à travers l'espace, c'est ce qu'on ap-

pelle *rayonnement* ou *radiation* ; et l'on nomme *absorption* l'inverse de la radiation, c'est-à-dire la pénétration de la chaleur rayonnante dans les corps.

On appelle *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique* la direction ou la ligne suivant laquelle la chaleur se propage.

On appelle *faisceaux* un ensemble de rayons.

La *chaleur obscure* est celle émise par un corps non lumineux. Ex. : un vase rempli d'eau à 100 degrés.

La *chaleur lumineuse* est celle émise par un corps lumineux. Ex. : le soleil, un fer rouge, etc., etc.

(*b*). *Enoncé des lois.*—1°. Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour du corps.

2°. Dans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne droite.

3°. La chaleur se propage dans le vide.

92. Lois de la réflexion régulière de la chaleur. (Enoncé).—Réflexion irrégulière ou diffusion. (Déf.).

(*a*). *Lois de la réflexion régulière de la chaleur.*

1°. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

2°. Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

(*b*). *Réflexion irrégulière ou diffusion.*—La chaleur qui tombe à la surface d'un corps ne se réfléchit pas toute entière suivant les lois de la réflexion régulière, une partie se réfléchit irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions autour du point d'incidence, phénomène qu'on désigne sous le nom de *réflexion irrégulière* ou de *diffusion.*

La réflexion régulière se produit sur les surfaces polies et la réflexion irrégulière, sur les surfaces rugueuses. (1)

(1) Le pouvoir diffusif d'une substance est le rapport entre la quantité de chaleur D qu'elle diffuse, c'est-à-dire qu'elle réfléchit dans tous les sens, et la quantité Q qu'elle reçoit ; ce qui donne, en représentant par d le pouvoir diffusif,

$$d = \frac{D}{Q}$$

93.—Pouvoir des corps par rapport à la chaleur : pouvoir réflecteur, pouvoir absorbant, pouvoir émissif, pouvoir diathermane. (Déf., nommer quelques corps qui possèdent ces pouvoirs au plus haut et au plus bas degré ; indiquer quelques applications).

(*a*). *Pouvoir réflecteur.*—Le pouvoir réflecteur est la propriété que possède un corps de pouvoir réfléchir une partie plus ou moins grande des rayons calorifiques qu'il reçoit.

C'est le rapport π entre la qualité de chaleur R que réfléchit le corps, et la quantité de chaleur Q qu'il reçoit. D'où l'expression :

$$\text{Pouvoir réflecteur ou } \pi = \frac{R}{Q}$$

En représentant par 100 le pouvoir réflecteur du cuivre jaune pris pour terme de comparaison, nous avons :

Cuivre jaune...	100	Verre...	10
Argent...	90	Etain amalgamé..	10
Acier...	70	Verre huilé...	5
Plomb..	60	Noir de fumée..	0

(*b*). *Pouvoir absorbant.*—On nomme ainsi la faculté plus ou moins grande que possède un corps d'absorber une certaine portion de la chaleur incidente. C'est le rapport a entre la quantité de chaleur absorbée A, et la quantité de chaleur Q ; d'où l'expression :

$$\text{Pouvoir absorbant ou } a = \frac{A}{Q}$$

Les pouvoirs absorbants se présentent dans l'ordre inverse des pouvoirs réflecteurs, et dans le même ordre que les pouvoirs émissifs.

En représentant par 100 le pouvoir absorbant du noir de fumée nous avons

Noir de fumée... ...	100	Gomme laque..	72
Colle de poisson.. ..	91	Métaux..	13

(*c*). *Pouvoir émissif.* — Le pouvoir émissif ou *pouvoir rayonnant* est la propriété que possèdent les corps d'émettre, à température et à surface égales, une quantité de chaleur plus ou moins grande.

En représentant par 100 la chaleur émise par le noir de fumée, nous aurons

Noir de fumée..	100	Mercure...	20
Papier...	98	Fer....	15
Verre blanc...	90	Etain, or et argent...	12

Tous les corps amorphes ont le même pouvoir émissif.

(*d*). *Applications.*—Pour les cafetières il y aurait avantage à ce que leur surface soit noire et dépolie, le pouvoir absorbant serait plus grand. Pour conserver un liquide chaud il faut le placer dans un vase de métal poli et brillant, Ex. : théières d'argent, le pouvoir émissif est moindre.

(*e*). *Pouvoir diathermane.*—Le pouvoir diathermane est la propriété qu'ont les corps de laisser passer plus ou moins la chaleur à travers leur masse sans les échauffer. Ex. : l'air, le verre. Les corps qui sont imperméables à la chaleur sont des corps *athermanes.*

Le pouvoir diathermane est donc le rapport entre la quantité de chaleur P que laisse passer un corps et la quantité de chaleur Q qu'il reçoit, en appelant D le pouvoir diathermane, nous aurons l'expression

$$D = \frac{P}{Q}$$

94. Chauffage : 1° par les cheminées, tirage ; 2° par les poêles ; 3° par la vapeur ; 4° par l'air chaud ; 5° par circulation d'eau chaude. (Notions).

(*a*). *Chauffage.*—Le chauffage a pour objet d'utiliser les sources de chaleur que nous offre la nature.

(*b*). *Cheminées.*—Les cheminées sont des foyers ouverts, adossés à un mur et surmontés d'un tuyau par lequel se dégagent les produits de la combustion. C'est encore le mode de chauffage le plus imparfait au point de vue économique ; car elles n'utilisent pas toute la chaleur dégagée, une partie étant entraînée par le courant d'air nécessaire à la combustion, cependant elles seront toujours le mode de chauffage le plus agréable et le plus sain, par la présence du feu et par le renouvellement continu qu'elles entretiennent dans l'air des appartements.

(*c*). *Tirage.*—Le tirage est un courant de bas en haut qui s'établit dans le tuyau par l'effet de l'ascension des produits de la combustion ; si le tirage est rapide et continu la cheminée *tire bien.*

Le tirage est dû à la différence de température à l'intérieur et à l'extérieur, car en vertu du principe d'Archimède, la colonne d'air échauffée, ayant une densité plus faible que l'air extérieur, doit éprouver de bas en haut une poussée égale à la différence entre le poids de la colonne échauffée et celui d'un même volume de l'air avec lequel elle est en communication ; c'est donc l'excès de pression qui détermine le mouvement ascensionnel.

(*d*). *Poêles.*—Les poêles sont des appareils de chauffage à foyer isolé, placés au milieu de la masse d'air qu'on veut échauffer, en sorte que la chaleur rayonne dans toutes les directions autour du foyer. C'est un mode de chauffage économique, mais moins salubre que les cheminées, donnant une ventilation très faible, répandant

une odeur désagréable et des émanations délétères, ceux de fonte et de tôle surtout.

(*e*). *Vapeur.*—Le chauffage à la vapeur est basé sur la propriété qu'ont les vapeurs de restituer leur chaleur de vaporisation lorsqu'elles se condensent. La vapeur circule dans les tuyaux où elle se condense et elle leur cède toute sa chaleur latente qui se transmet ensuite à l'air ou au liquide dans lequel sont placés les tuyaux de conduite.

(*f*). *Air chaud.*—Ce mode de chauffage consiste à chauffer l'air dans la partie inférieure d'un édifice et à le laisser ensuite s'élever jusqu'aux étages supérieurs en vertu de sa moindre densité, par des tuyaux de conduite placés dans les murs, ce genre de chauffage est plus économique que les cheminées, mais il ventile mal les appartements ; alors pour obvier à cet inconvénient il faut placer en haut des appartements des bouches de départ pour permettre à l'air vicié de se dégager.

(*g*). *Circulation d'eau chaude.*—Le chauffage par la circulation d'eau chaude consiste en un mouvement circulatoire continu d'eau qui, après s'être échauffée dans une chaudière, s'élève dans une série de tubes et qui après s'être refroidie revient à la chaudière par une série de tubes semblables. Son principal avantage, c'est de donner une température constante.

95. Principe des machines à vapeur.— Générateur de vapeur.—Distribution de vapeur.—Détente. — Condenseur.

(*a*). *Principe des machines à vapeur.*—Les machines à vapeur sont des appareils servant à utiliser la force élastique de la vapeur d'eau comme force motrice.

(*b*). *Générateur de vapeur.*—Le *générateur* ou *chaudière* est l'appareil qui sert à la production de la vapeur, il consiste en un récipient métallique clos hermétiquement

et en grande partie rempli d'eau, il est exposé à la chaleur du foyer qui réduit l'eau en vapeur.

Il y a la *chaudière à bouilleurs* qui consiste en un long cylindre en tôle fermé à ses deux extrémités, au-dessous sont deux cylindres d'un plus petit diamètre et communiquant avec le générateur chacun par deux tubulures, ; ces deux cylindres se nomment les *bouilleurs*, et comme ils sont destinés à recevoir le coup de feu du foyer ils sont complètement remplis d'eau tandis que le grand cylindre ou *générateur* l'est seulement à un peu plus de la moitié ; ce genre de générateur est appliqué aux machines fixes.

(*c*). *Distribution de vapeur.*—La distribution de vapeur est le mécanisme qui sert à faire passer la vapeur alternativement au-dessus et au-dessous du piston. La vapeur arrivant du générateur se rend dans une boîte de fonte, qui est la *boîte à distribution.* De celle-ci, dans l'épaisseur même des parois du cylindre partent deux conduits dirigeant la vapeur l'un au-dessus, l'autre au-dessous du piston. Une pièce mobile, qu'on nomme la *glissière* ou le *tiroir*, ferme toujours un de ces conduits.

(*d*). *Détente.*—Si la vapeur arrive en plein sur le piston pendant toute la durée de sa course, sa force élastique reste sensiblement la même, et l'on dit que la vapeur agit *sans détente* ; mais si la vapeur cesse d'arriver sur le piston, lorsque celui-ci est seulement aux deux tiers ou aux trois quarts de sa course, alors *elle se détend*, c'est-à-dire qu'en vertu de la force expansive due à sa haute température, elle agit encore sur le piston et achève de lui faire parcourir sa course. La détente économise la vapeur et par suite le combustible.

(*e*). *Condenseur.*—Le condenseur est un récipient dans lequel un jet d'eau froide est projeté en pluie en sens inverse de l'arrivée de la vapeur et dans lequel elle se liquéfie après avoir agi sur le piston. La vapeur en se

condensant produit un vide plus ou moins complet, ce qui fait gagner au moins les 4-5 d'une atmosphère, sur le système des machines à *échappement libre* c'est-à-dire sans condenseur.

96. Equivalent mécanique de la chaleur.

Cet équivalent est le *cheval-vapeur* qui représente le travail nécessaire pour élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en une seconde, c'est-à-dire qu'il équivaut à 75 kilogrammètres.

CHAPITRE NEUVIEME.

LUMIÈRE.

97. Lumière, théorie des ondulations.

On appelle *lumière* la cause des phénomènes qui provoquent en nous, par l'intermédiaire du sens de la vue, les sensations de *la vision*. Ces phénomènes sont appelés eux-mêmes *phénomènes lumineux*.

Pour expliquer l'origine de la lumière on a adopté l'hypothèse des ondulations ; les molécules des corps lumineux sont animés d'un mouvement vibratoire infiniment rapide qui se communique à notre organe en faisant vibrer de proche en proche *l'éther* répandu dans tout l'univers. En sorte que la sensation de la lumière, comme celle du son et de la chaleur a pour cause une communication de mouvement.

98. Corps lumineux, éclairés, diaphanes, translucides, opaques. (Déf.).

(*a*). *Corps lumineux.*—Sont ceux qui émettent de la lumière par eux-mêmes. Ex. : soleil, les corps en ignition.

(*b*). *Corps éclairés.*—Ce sont des corps non lumineux, mais qui peuvent devenir visibles pour nous à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir de la lumière d'une source quelconque. Ex. : la lune.

(*c*). *Corps diaphanes.*—Les corps *diaphanes* ou *transparents* sont ceux qui laissent passer facilement la lumière et à travers lesquels on distingue nettement les objets. Ex. : l'eau, le verre poli.

(*d*). *Corps translucides.*—Sont ceux au travers desquels on perçoit encore la lumière mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets. Ex. : verre dépoli.

(*e*). *Corps opaques.*—Ce sont ceux qui ne se laissent nullement traverser par la lumière. Ex. : le bois, les métaux.

99. Propagation de la lumière dans un milieu homogène, rayon lumineux. — Ombre, pénombre, reflet. (Notions).

(*a*). *Propagation de la lumière dans un milieu homogène.*

Loi.—Dans tout milieu homogène la lumière se propage en ligne droite.

On appelle *milieu* l'espace plein ou vide dans lequel se produit un phénomène. Ex. : l'air, l'eau, le verre sont des milieux homogènes dans lesquels se propage la lumière.

On appelle *milieu homogène* un espace dont toutes les parties, la composition et la densité sont les mêmes

La loi sur la propagation de la lumière est vérifiée par ce fait que, lorsque la lumière pénètre dans une chambre noire par une petite ouverture, elle trace dans l'air un trait lumineux rectiligne, trait qui est très visible parce qu'il éclaire les poussières en suspension dans l'atmosphère.

(*b*). *Rayon lumineux.*—Le rayon lumineux est la direction rectiligne suivant laquelle la lumière se propage ; un ensemble de rayons prend le nom de *faisceau*, et un faisceau très délié, celui de *pinceau*.

(c). *Ombre, pénombre.* — L'ombre d'un corps est le lieu de l'espace où il empêche la lumière de pénétrer; suivant

(Fig. 56).

que la source lumineuse est un point unique *S* (fig. 56) on a *une ombre G H ;* si, au contraire, la source lumineuse est un corps *S'* (fig. 57) d'une étendue quelconque, on a une ombre *G H* et une pénombre *I K*, la pénombre est plus éclairée que l'ombre.

(Fig. 57).

(*d*). *Reflet.*—Dans un corps opaque, la place opposée à celle qui intercepte la lumière n'est jamais complètement obscure, elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins, et c'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet.*

100. Photomètres. (Déf., en indiquer un et en donner le principe).

La vitesse de la lumière est estimée à environ 308,000

kilomètres par seconde, et cette vitesse de propagation est moins grande dans l'eau que dans l'air.

L'intensité d'une source lumineuse est la quantité de lumière qu'elle envoie normalement sur l'unité de surface d'un corps éclairé, placé à l'unité de distance.

L'intensité de la lumière, c'est-à-dire la quantité de lumière reçue normalement sur une surface donnée est en raison inverse du carré de la distance à la source lumineuse.

Photomètres.—Ce sont des appareils dont on se sert pour comparer les intensités de diverses sources lumineuses ;

(Fig. 58).

le photomètre de Rumford (fig. 58) se compose d'un écran *E* en verre dépoli devant lequel est fixé une tige opaque *T*. A une certaine distance sont placées les lumières que l'on veut comparer ; supposons une lampe L et une bougie *B*, les ombres projetées *A* et *C* par ces deux sources lumineuses sont d'abord d'inégale intensité, mais en reculant la lampe, ou en l'approchant peu à peu on obtient une position où l'intensité des deux ombres est la même, ce qui indique que l'écran est également éclairé par les deux lumières. Alors les intensités de ces deux lumières sont directement proportionnelles aux carrés de leurs distances aux ombres projetées, c'est-à-dire que si la lampe est, par exemple, 3 fois plus éloignée que la bougie, cela indique qu'elle éclaire 9 fois plus.

Soit : i = l'intensité de la lampe à l'unité de distance.
" i' = " de la bougie à " "
" d = la distance de la lampe à l'ombre projetée sur l'écran.
" d' = la distance de la bougie à l'ombre projetée sur l'écran.

D'après la loi de l'intensité de la lumière, l'intensité de la lampe à la distance d est $\frac{i}{d^2}$, et celle de la bougie $\frac{i'}{d'^2}$ à la distance d'.

Or sur l'écran, ces deux intensités sont égales ; on a donc l'égalité :

$$\frac{i}{d^2} = \frac{i'}{d'^2} \text{ d'où } \frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2} \text{ c. q. f. d}$$

101. Lois de la réflexion de la lumière. (Enoncé).— Réflexion irrégulière. (Notion).

(*a*). *Lois de la réflexion de la lumière.*

1°. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

2°. Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

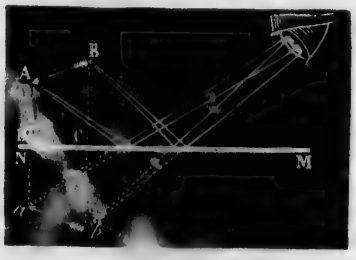
(*b*). *Réflexion irrégulière.*—Lorsque le corps qui réfléchit la lumière est opaque, celle-ci se partage en deux parties, l'une qui est réfléchie régulièrement et l'autre irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions ; c'est la *lumière diffuse*, c'est elle qui nous fait voir les corps, car la réflexion de la lumière ne nous transmet que l'image de l'objet qui l'émet et non l'image du corps qui la réfléchit.

102. Miroirs plans. (Déf.). — Détermination graphique des images dans les miroirs plans. — Distinction entre les images réelles et les images virtuelles.

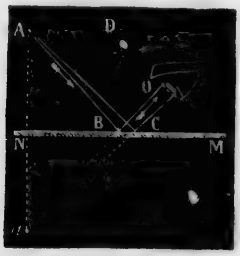
Les miroirs sont des surfaces polies planes ou courbes, qui réfléchissent les images des objets.

(*a*) *Miroirs plans.*—Dans un miroir plan, nous voyons les objets derrière sa surface et dans une position symétrique à cette surface.

Supposons (fig. 59) qu'un point lumineux *A* soit placé devant le miroir *M N* et qu'un rayon *A I* parti de ce point rencontre l'œil en *O*. Si abaissant la perpendicu-



(Fig. 59).



(Fig. 60).

laire *A N* et la prolongeant indéfiniment, nous prolongeons le rayon réfléchi *O I* jusqu'à sa rencontre en *a* avec cette perpendiculaire, nous aurons deux triangles *A I N* et *a I N* égaux comme étant des triangles rectangles, dans lesquels le côté *I N* est commun et compris entre deux angles égaux, savoir ; *A N I* et *a N I* qui sont droits, et les angles *A I N* et *a I N*, qui sont égaux entre eux comme l'étant tous deux à l'angle *O I M*. De l'égalité de ces triangles nous concluons que $N\,A = N\,a$ et que *a* image de *A* est symétrique à ce dernier point, par rapport à la surface *M N*, et qu'il suffit pour le déterminer de prolonger *O I* jusqu'à la rencontre du pro-

longement de la perpendiculaire $A\ N$ abaissée du point lumineux A sur le miroir.

D'où l'on déduit que, dans un miroir plan, nous voyons les objets derrière sa surface et dans une position symétrique à cette surface.

(*b*). *Détermination graphique des images dans les miroirs plans.*—D'après la règle ci-dessus, il est certain qu'on obtiendra l'image d'un objet quelconque (fig. 60) en construisant l'image de chacun de ses points ; c'est ce que nous montre, construite d'après ce principe, l'image $a\ b$ d'un objet quelconque $A\ B$, d'où l'on déduit que, dans les miroirs plans, *l'image est de même grandeur que l'objet, symétrique et non renversée.*

(*c*). *Distinction entre les images réelles et les images virtuelles.*—Les rayons réfléchis par les miroirs peuvent être divergents ou convergents ; dans le cas de la divergence les rayons réfléchis ne se rencontrent pas, mais si on les suppose prolongés de l'autre côté du miroir, ils peuvent se rencontrer en un même point (fig. 59 et 60). Dans ce cas, l'œil voit une image qui n'existe pas réellement, puisque les rayons lumineux ne passent pas de l'autre côté du miroir, c'est donc une illusion, et on donne à cette image le nom *d'image virtuelle.*

Dans le cas de la convergence, les rayons réfléchis se rencontrent en un point situé en avant du miroir et du même côté de l'objet ; dans ce cas *l'image est réelle*, elle peut être reçue sur un écran, c'est ce que nous verrons dans les miroirs concaves ; les miroirs plans donnant toujours des images virtuelles.

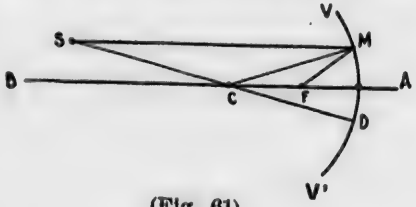
En résumé, les *images réelles* sont celles qui sont formées par les rayons réfléchis eux-mêmes, et les *images virtuelles*, celles qui sont données par leur prolongement.

103.— Miroirs sphériques. (Déf.).— Détermination graphique du foyer principal, du foyer conjugué, du foyer virtuel dans les miroirs concaves.—Construction

graphique des images réelles et des images virtuelles dans les miroirs concaves. — Détermination graphique des foyers et des images dans les miroirs convexes.

(*a*). Le miroir sphérique est une portion de surface de sphère. Il est concave ou convexe selon que la réflexion a lieu sur la face interne ou sur la face externe.

Le point *A*, milieu de l'arc (fig. 61), est le *centre de figure ;* le point *c*, centre de la sphère supposée, est le *centre de courbure* ou *centre géométrique.* La droite indéfinie *A B*, qui passe par le centre de figure *A* et le centre de courbure *C*, est *l'axe principal* du miroir. L'arc



(Fig. 61).

V A V', suivant lequel est coupé le miroir par un plan passant par l'axe principal, est nommé *section principale* ou *section méridienne.* Enfin, *l'ouverture* du miroir est l'angle *V C V'* que l'on appelle aussi *l'amplitude* du miroir, et toute ligne passant par le centre *C* sans passer par le point *A* est un axe secondaire, soit *S C D.*

(*b*). *Détermination graphique du foyer principal, du foyer conjugué, du foyer virtuel dans les miroirs concaves.*

Dans les miroirs courbes, on nomme *foyers* des points où vont concourir les rayons réfléchis ou leurs prolongements, d'où deux sortes de foyers, les *foyers réels* et les *foyers virtuels ;* et dans les miroirs concaves les foyers se divisent en *foyers conjugués* et *foyers principaux.*

1°. *Foyer principal.*—La surface des miroirs courbes peut être considérée comme formée d'une infinité de

surfaces planes infiniment petites, qui en sont les éléments ; or la *normale* à une surface courbe est la perpendiculaire à l'élément correspondant ou, ce qui est la même chose, au plan tangent qui le contient. Or, nous savons que, dans une sphère, la perpendiculaire au plan tangent, menée par le point de contact, passe par le centre, d'où la normale à tout miroir sphérique, en un point quelconque, s'obtient en joignant ce point au centre de courbure par une droite.

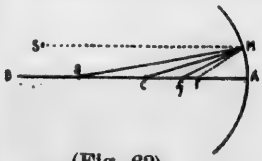
Ceci dit, supposons qu'un rayon lumineux *S M* (fig. 61) soit parallèle à l'axe principal et vienne sur la surface du miroir au point d'incidence *M*, la normale en ce point sera, d'après ce que nous avons dit, le rayon C M de la sphère ; l'angle d'incidence *S M C* sera égal à l'angle de réflexion *C M F* et dans la même section principale. Le point *F* d'intersection du rayon réfléchi et de l'axe principal est appelé le *foyer principal* du miroir, et la distance *F A* du foyer principal au centre de figure est appelée la *distance focale.*

Tous les rayons parallèles à l'axe viendront également concourir au même point *F*. En effet, les angles *S M C*, *M C F* sont égaux comme alternes internes, mais l'angle *C M F* qui est l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence *S M C ;* ce dernier étant égal à *M C F*, donc *C M F* est égal à *M C F ;* par suite, dans le triangle *C M F*, les côtés *C F* et *F M* sont égaux comme opposés à des angles égaux, le triangle est donc isocèle et l'on a $C F = F M$.

Mais l'ouverture de l'arc *V V'* étant d'un très petit nombre de degrés, *F M* est sensiblement égal à *F A ;* car *F M* approcherait d'autant plus d'égaler *F A* que l'arc *M A* est plus petit ; alors nous pouvons donc admettre que *F M* est égal à *F A* et que le point *F* est le milieu de *C A*. Le foyer principal d'un miroir sphérique est donc situé sur son axe principal, à une égale distance du centre de courbure et du centre de figure.

Réciproquement, si la source lumineuse était placée au foyer principal, les rayons qu'elle émettrait prendraient, après s'être réfléchis sur le miroir, une direction parallèle à l'axe principal.

2°. *Foyers conjugués.*—Supposons que le point lumineux parte d'un point S' (fig. 62), situé sur l'axe principal, et rencontre le miroir en M, le rayon réfléchi $M\ f$ rencontrera l'axe principal en un point f placé entre le centre de courbure C et le foyer principal, l'angle $C\ M\ f$ étant plus petit que $C\ M\ F$; de même, si la source lumineuse est en f, ses rayons, après s'être réfléchis sur le miroir, se croiseront en S'. Les points S' et f, qui ont entre eux cette relation, se nomment *foyers conjugués.*

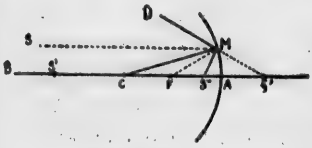


(Fig. 62).

Si le point S' s'approche ou s'éloigne du centre C, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne avec lui.

Si l'objet lumineux coïncide avec le centre C, les angles d'incidence et de réflexion sont nuls et le foyer se confond avec le point lumineux.

3°. *Foyer virtuel.*—Si l'objet lumineux est placé en S'' (fig. 63), entre le foyer principal et le centre de figure, le point M, occupant toujours la même position dans la section principale, l'angle $S''\ M\ C$ étant plus grand que l'angle $F\ M\ C$, l'angle $C\ M\ D$ est plus grand que l'angle $C\ M\ S$. Le rayon réfléchi $M\ D$ n'aura pas de foyer conjugué ; mais si on le suppose prolongé de l'autre côté du miroir, son prolongement ira rencontrer l'axe en f' d'autant plus près du miroir que le point S'' en



(Fig. 63)

sera lui-même plus rapproché. Le foyer f' est alors *virtuel ;* il est *foyer conjugué virtuel* du point S''.

(*c*). *Construction graphique des images réelles et des images virtuelles dans les miroirs concaves.*

1°. *Images réelles.*—Soit un objet $A\ B$ placé au delà du centre d'un miroir concave, tirons les axes secondaires $A\ E$ et $B\ I$ des points A et B, puis menons des rayons

(Fig. 64).

$A\ D$ et $B\ G$ parallèles à l'axe principal, ces rayons vont passer après la réflexion par le foyer principal F et former le rayon $A\ D$ en a et le rayon $B\ M$ en b, sur les axes secondaires $A\ E$ et $B\ I$ l'image du point A et du point B, mais alors en sens inverse ; on a donc en $a\ b$ l'image de $A\ B$ renversée.

Cette image est réelle, renversée, placée entre le centre de courbure et le foyer principal, et d'autant plus petite par rapport à l'objet, que celui-ci est plus éloigné.

Réciproquement, si l'objet dont on cherche l'image était en $a\ b$, son image se formerait en $A\ B$, mais alors plus grande que l'objet, et si l'objet était placé au foyer principal il n'y aurait pas d'image car les rayons $A\ M$ et $A\ D$ émis du point A donnent, (fig. 65) après réflexion, un faisceau $D\ M\ H\ I$ parallèle à l'axe secondaire $C\ D$, et les rayons émis du point B, un faisceau parallèle à

l'axe secondaire *C E* ; ces faisceaux ne peuvent former ni foyers ni images.

(Fig. 65).

Enfin, quand l'objet *A B* (fig. 66) a tous ses points hors de l'axe principal, on trouve, par la construction, que

(Fig. 66).

l'image se forme en *a b*, de l'autre côté de l'axe principal *I K*.

2°. *Image virtuelle.*—Soit un objet *A B* (fig. 67), placé entre le foyer principal *F* et le miroir, on trace d'abord les axes secondaires *C A* et *C B* en ayant soin de les prolonger au delà du miroir, puis, tirant les rayons *A D* et *B E* parallèles à l'axe principal et, par le foyer *F*, les rayons réfléchis *D F* et *E F*, et les prolongeant au delà du miroir, ils viennent rencontrer le prolongement des axes secondaires aux points *a* et *b* et nous donnent l'image *A B* en *ab* et droite. L'image est virtuelle, re-

dressée, plus grande que l'objet et située derrière le miroir.

(Fig. 67).

(*d*).—*Détermination graphique des foyers et des images dans les miroirs convexes.*

1°. *Foyers.*—Les miroirs étant convexes, les rayons réfléchis ne peuvent rencontrer l'axe et il ne peut y avoir que des *foyers virtuels.*

(Fig. 68).

Soit *S m*, un rayon incident parallèle à l'axe principal d'un miroir convexe, et *C n*, la normale, le rayon réfléchi prendra une direction divergente *M D* et ne rencontrera

l'axe que par son prolongement géométrique en un point F qui est le *foyer virtuel principal* du miroir.

Si le point lumineux S' est situé (fig. 68) sur l'axe principal, à une distance finie, la construction montrera que le *foyer conjugué virtuel* aura lieu en f, entre le miroir et le foyer principal et que le point lumineux se rapprochant du miroir, le foyer conjugué s'en rapproche également.

2°. *Images (miroirs convexes).*—Soit un objet $A\ B$ (fig. 69) placé devant un miroir convexe à une distance quelcon-

(Fig. 69).

que, tirant les axes secondaires $A\ C$ et $B\ C$ les rayons parallèles $B\ I$ et $A\ K$ à l'axe principal, le prolongement des rayons réfléchis en K et en I passent par F, joignant les points K et I au foyer F par les droites $K\ F$ et $I\ F$ ces droites coupent les axes secondaires $A\ C$ et $B\ C$ aux points a et b qui sont les *foyers virtuels* de A et B ; l'œil qui reçoit les rayons réfléchis $I\ D$ de $K\ H$ voit en ab l'image $A\ B$, image virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.

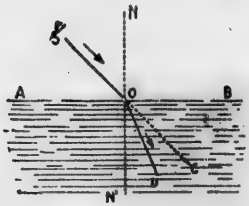
104. Réfraction de la lumière. (Déf.). — Enoncé des lois de la réfraction simple.

(*a*). *Réfraction de la lumière.*—On appelle réfraction de la lumière, la déviation qu'éprouve un rayon lumineux de sa direction primitive, quand il passe obliquement

d'un milieu homogène dans un autre milieu homogène de nature différente.

Si le rayon lumineux était perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux, il n'y aurait pas déviation et le rayon continuerait à se propager en ligne droite.

Soit *S O*, un rayon incident, passant de l'air dans l'eau ; *N O N'* la normale, c'est-à-dire la perpendiculaire élevée au point d'incidence à la surface qui sépare les deux milieux ; *A B* la surface du second milieu, c'est-à-dire de l'eau. Le rayon *S O*, au lieu de suivre la direction *S O C*, se brisera au point *O* et prendra une nouvelle direction *O D* plus rapprochée de la normale ; et l'angle *D O N'*, appelé *angle de réfraction*, sera plus petit que l'angle *S O N* appelé *angle d'incidence*.



(Fig. 70).

Suivant que le rayon réfracté s'approche ou s'écarte de la normale, on dit que le second milieu est plus ou moins réfringent que le premier.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux simple à l'incidence est encore simple à la réfraction, mais dans certains corps cristallisés comme le spath d'Islande, le rayon incident donne naissance à deux rayons réfractés.

Le premier phénomène constitue la *réfraction simple*.
Le second " " la *réfraction double*.

(*b*). *Enoncé des lois de réfraction simple.*

1°. Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour deux mêmes milieux, mais variables si les milieux changent.

2°. Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire qui sépare les deux milieux.

105. Indice de réfraction. (Déf.).—Angle limité et réflexion totale. (Notion). — Théorie succincte du mirage.

(*a*). *Indice de réfraction.*—On appelle *indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier, le rapport qui existe entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction. On nomme sinus de l'angle *A I B* (fig. 71) la perpendiculaire *A B* abaissée d'une extrémité de l'arc *A O* sur le rayon *I N* passant par l'autre extrémité, et le sinus de *A' I B'* sera la perpendiculaire *A' B'*.

(Fig. 71).

Or l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air sera exprimé par la relation :

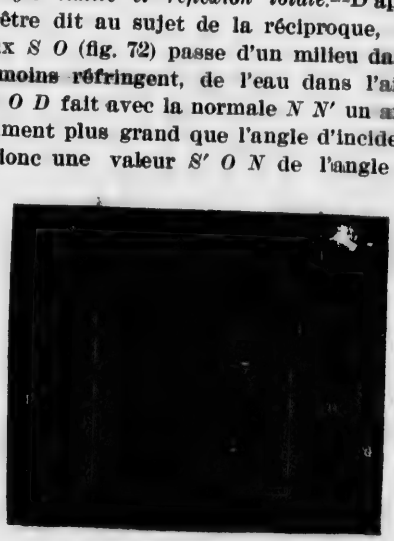
$$\frac{A\ B}{A'\ B'} = \frac{Sin.\ I.}{Sin.\ R.} = n$$

n représentant l'indice.

L'indice varie avec les milieux ; ainsi, quand on dit que l'indice de réfraction du verre est $\frac{3}{2}$, ou que celui de l'eau est $\frac{4}{3}$, on entend dire que ces membres se rapportent au cas où la lumière passe de l'air dans le verre, ou de l'air dans l'eau. Si la lumière passait du vide absolu dans un milieu transparent, on aurait *l'indice absolu* ou *principal* de ce milieu.

Réciproquement, si l'on considère les milieux dans un ordre inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans l'air, on constate que les rayons suivent le même chemin, mais en sens contraire ; dans ce cas le rayon réfracté est plus grand que le rayon incident.

(*b*). *Angle limite et réflexion totale.*—D'après ce qui vient d'être dit au sujet de la réciproque, si un rayon lumineux *S O* (fig. 72) passe d'un milieu dans un autre milieu moins réfringent, de l'eau dans l'air, le rayon réfracté *O D* fait avec la normale *N N'* un angle *N' O D* constamment plus grand que l'angle d'incidence *S O N*. Il y a donc une valeur *S' O N* de l'angle d'incidence



(Fig. 72).

pour laquelle l'angle de réfraction *N' O D'* est droit et le rayon réfracté *O D'* coïncide avec la surface de séparation. Si l'on augmente encore cet angle *S' O N*, appelé *angle* limite, le rayon réfracté ne franchit pas la surface de séparation, il se réfléchit entièrement sur cette surface et fait un angle de réflexion *N O D''* égal à l'angle d'incidence *N O S''*. On dit alors qu'il y a *réflexion totale*, parce que la lumière incidente est réflé-

chie en totalité. Du verre à l'air, l'angle limite est de 41° 48′ et dans le cas qui nous concerne, c'est-à-dire de l'eau à l'air il est de 48° 35′, valeur de l'angle *S′ O N*.

Si un objet *P* est placé sur le rayon incident *S″ O*, on pourra voir cet objet, du point *H* situé sur la direction *O D″*. L'image de *P* sera aperçue en *p*, par l'effet de la réflexion.

(*c*). *Mirage.*—Le mirage est un phénomène d'optique qui fait apercevoir une image renversée des objets. Il se produit fréquemment dans les contrées chaudes et sablonneuses.

Le mirage est un phénomène de *réflexion totale* qui résulte de l'inégale densité des couches de l'atmosphère lorsqu'elles sont dilatées par leur contact avec le sol fortement échauffé. Les couches les moins denses, étant les plus inférieures, sont de moins en moins réfringentes ; l'angle d'incidence croît donc d'une couche à la suivante et finit par atteindre l'angle limite au delà duquel à la réfraction succède la réflexion intérieure ; alors le rayon se relève et subit une suite de réfractions successives en sens contraires des premières, car il passe maintenant dans des couches de plus en plus réfringentes et le rayon lumineux arrive à l'œil avec la même direction que s'il était parti d'un point situé au-dessus du sol et donne une image renversée. Les navigateurs observent aussi des mirages, mais alors les couches les plus denses sont au contact de l'eau.

106. Prismes. (Déf.)—Marche des rayons de lumière dans les prismes, angle de déviation.

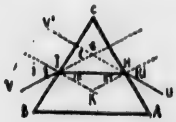
(*a*). *Prismes.*—Un prisme, en optique, est un milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur l'autre. L'intersection de ces deux faces est une ligne droite qui est l'*arête* ou *sommet du prisme*, et l'angle qu'elles comprennent est son *angle réfringent*.

Quand un rayon entre dans un milieu plus réfringent,

il se rapproche de la normale ; au contraire, passant dans un milieu moins réfringent, il s'écarte de la normale.

Toute section, faite perpendiculairement à l'arête, est la *section principale ;* cette section est triangulaire. La face opposée à l'arête est la base. L'appareil a donc la forme d'un prisme triangulaire, les rayons qui le traversent sont déviés vers sa base.

Soit un rayon $V\ I$ (fig. 73) rencontrant, au point I, la surface $B\ C$ d'un prisme $A\ B\ C$. Ce rayon se réfracte en I en se rapprochant de la normale $I\ K$, puisqu'il entre dans un milieu plus réfringent, et prend une direction $I\ H$ déterminée

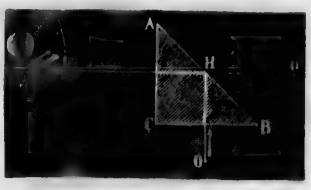


(Fig. 73).

par l'égalité $\frac{\sin. i}{\sin. r} = \frac{3}{2}$. Mais en H, où il rencontre la surface $A\ C$, il subit une seconde réfraction, et, comme il passe alors dans l'air, qui est moins réfringent que le verre, il s'écarte de la normale $K\ H$ et prend une direction $H\ U$ donnée par l'égalité $\frac{\sin. r'}{\sin. i'} = \frac{2}{3}$. La lumière se réfracte donc deux fois dans le même sens, et l'œil, qui reçoit le rayon émergent $H\ U$, voit, à l'extrémité de ce rayon, le point lumineux qui, en réalité, est en V. La déviation que le prisme imprime ainsi au rayon de lumière est mesurée par l'angle que fait le rayon émergent $H\ U$ avec le prolongement du rayon incident $V\ G$. On le nomme *angle de déviation*, c'est-à-dire l'angle $V\ G\ V'$.

La déviation d'un rayon dépend de l'angle d'incidence; elle devient *minimum* quand les angles d'incidence et d'émergence sont égaux.

Quand la question principale d'un prisme est un triangle rectangle isocèle (fig. 74), il offre une application importante de la réflexion totale (105-b). Soit le prisme *A B C* dont la section principale représente un triangle rectangle isocèle, *O m* point lumineux et *O H* un rayon perpendiculaire à la face *B C*. Ce rayon, entrant dans le verre sans se réfracter (104-*a*), va faire, avec la grande face *A B*, un angle égal à *B*, c'est-à-dire de 45 degrés et par suite plus grand que l'angle limite du verre, lequel est de 48 (105-*b*). Dans tout triangle, la somme des angles est égale à deux droits ou 2 fois 90 degrés, c'est-à-dire à 180 degrés ; or dans un triangle rectangle isocèle, l'angle au sommet étant égal à un droit, c'est-à-dire 90 degrés, les deux angles à la base, qui sont égaux, seront égaux chacun à la moitié d'un droit, c'est-à-dire $\frac{90}{2} = 45$ degrés. Le rayon *O H* subit donc en *H* la réflexion totale, qui lui imprime une direction *H I* perpendiculaire à la seconde face *A C*. La grande face du prisme produit donc ici l'effet du miroir plan le plus parfait, et l'œil, placé en *I*, voit en *O'* l'image du point *O*. Propriété utilisée dans certains instruments d'optique.



(Fig. 74).

107. Lentilles. (Déf.). — Différentes espèces de lentilles. (Déf.).— Assimilation des lentilles aux prismes pour la marche des rayons lumineux. (Notions).

(*a*). *Lentilles.*—Les lentilles sont des milieux transparents qui, vu la courbure de leurs surfaces, ont la propriété de faire *converger* ou *diverger* les rayons lumineux qui les traversent.

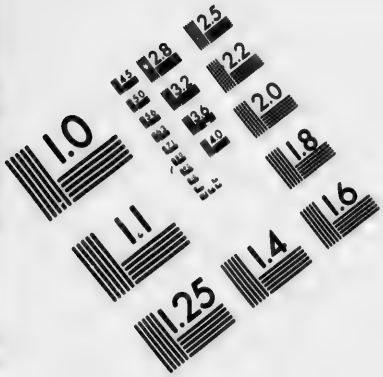
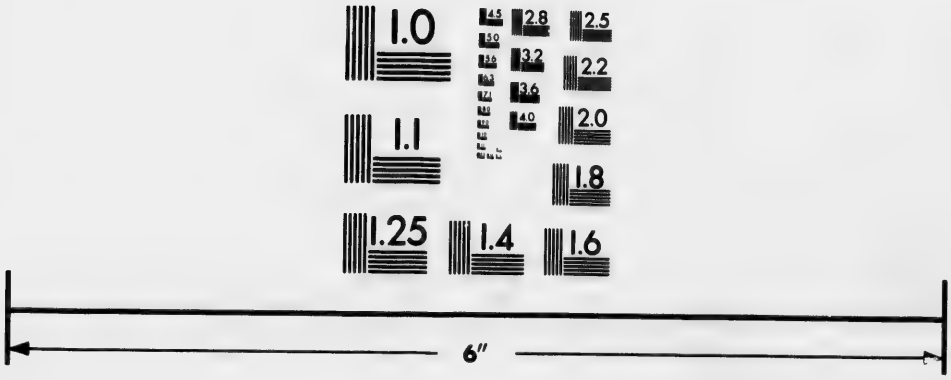
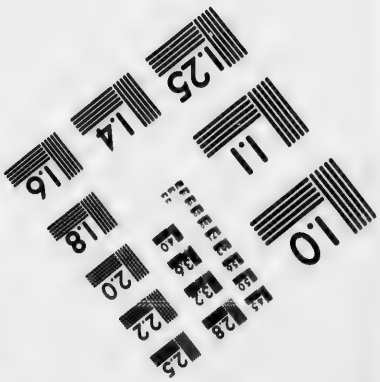


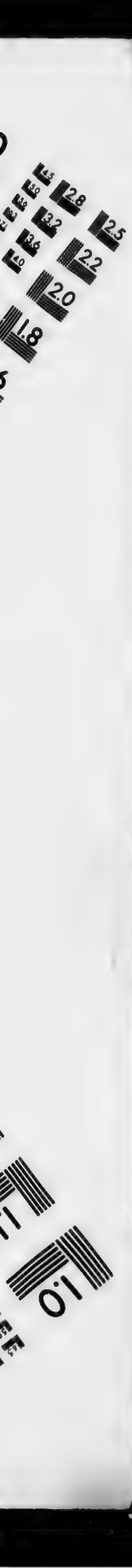
IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (MT-3)





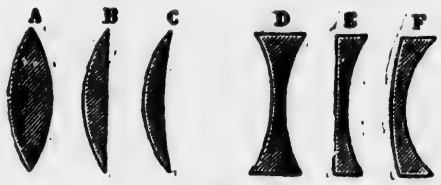
Photographic
Sciences
Corporation

23 WEST MAIN STREET
WEBSTER, N.Y. 14580
(716) 872-4503


2.8
3.2
3.6
4.0
2.5
2.2
2.0
1.8
1.0

Les lentilles sont généralement de *crown-glass*, verre qui contient peu de plomb, ou de *flint-glass*, verre qui en contient beaucoup et qui est plus réfringent que le *crown*.

On compte six espèces de lentilles : trois sont *convergentes*, c'est-à-dire ont la propriété de rapprocher les uns des autres les rayons qui les traversent ; les trois autres sont *divergentes*, c'est-à-dire ont la propriété d'éloigner les rayons lumineux les uns des autres.



(Fig. 75).

Les lentilles *convergentes* sont plus épaisses au milieu que vers les contours.

La première lentille *A* est appelée lentille *biconvexe*.

La deuxième lentille *B* est appelée lentille *plan convexe*.

La troisième lentille *C* est appelée lentille *ménisque convergent ou concave—convexe convergent*.

Les lentilles divergentes sont plus minces au milieu que vers les bords.

La première lentille D est appelée lentille *Biconcave*.

La deuxième lentille *E* est appelée lentille *plan concave*.

La troisième lentille *F* est appelée lentille *ménisque divergent* ou *concave convexe divergent*.

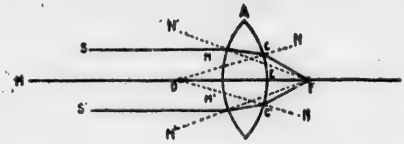
Dans les lentilles dont les deux faces sont plus sphériques, les centres de ces surfaces sont dits *centres de courbure ;* la droite, menée par ces deux centres, est *l'axe principal* et si l'une des faces est plane, l'axe principal

est la perpendiculaire abaissée du centre de la face sphérique sur la face plane.

Pour comparer la marche des rayons dans les lentilles à celle qui a lieu dans les prismes, on assimile une lentille biconvexe à deux prismes dont les bases coïncident ; on conçoit que tout rayon qui tombera entre l'un des sommets de la lentille et son axe principal, devra se rapprocher de cet axe et sera un rayon convergent ; en effet, cet axe représente les deux bases des deux prismes qui coïncident pour former la lentille et nous savons que le prisme dévie vers sa base les rayons qui le traversent (106). D'un autre côté, en assimilant une lentile biconvexe à deux prismes dont les sommets coïncident vers son milieu, les rayons lumineux qui tomberont au-dessus ou au-dessous de l'axe principal devront s'en écarter pour se rapprocher des bases des prismes supposés.

108. Détermination graphique du foyer principal, des foyers conjugués et des foyers virtuels dans les lentilles biconvexes. — Centre optique et axes secondaires. (Déf.). — Construction graphique des images réelles et des images virtuelles dans les lentilles biconvexes. — Détermination graphique des foyers et des images dans les lentilles biconvexes.

(*a*) *Détermination graphique du foyer principal, des foyers conjugués et des foyers virtuels dans les lentilles biconvexes.*



(Fig. 76).

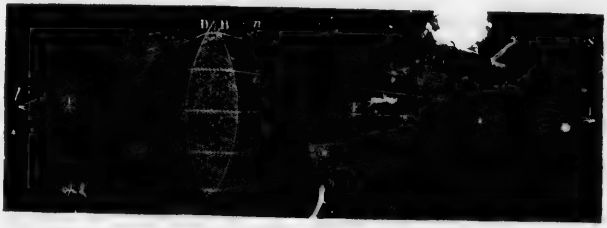
1. Foyer principal (lentille biconvexe).—Dans les lentilles comme dans les miroirs, on nomme *foyers* les points où vont concourir les rayons réfractés ou leur prolongement.

Soit (fig. 76) les rayons lumineux $S\ m$ et $S'\ m'$ tombant sur la lentille biconvexe A parallèles à son axe principal $M\ F$, ces rayons éprouvent deux déviations, l'une aux points d'incidence m et m' en se rapprochant des normales $N'\ F$ et $n'\ F$, la seconde aux points d'émergence c et c' en s'écartant des normales $N\ D$ et $n\ D$ (106). Par ces deux réfractions successives, ces rayons, comme tous les rayons parallèles à l'axe, viennent couper l'axe en un point F, appelé *foyer principal*, et la distance $E\ F$ est la *distance focale*.

Si la source lumineuse était placée au point F, les rayons émergents seraient parallèles à l'axe principal.

Dans les lentilles ordinaires, qui sont de crown, le foyer principal coïncide très approximativement avec le centre de courbure.

2. Foyer conjugué.—Lentille biconvexe.—Si l'objet lumineux est situé sur l'axe (fig. 77) et au delà du foyer prin-



(Fig. 77).

cipal F', les rayons incidents formeront un faisceau divergent, qui, après avoir traversé la lentille, ira couper l'axe en un point f, plus éloigné de la lentille que le point F. Le point f est le *foyer conjugué* du point S. Si l'objet

lumineux était placé en *f*, son faisceau incident irait concourir au point *S*, qui serait alors le foyer conjugué de *f*. En effet le point lumineux étant en *S*, si l'on compare le rayon incident *S n* au rayon *S' n* parallèle à l'axe, on reconnaît que le premier fait avec la normale *m F* un angle d'incidence *S n m* plus grand que l'angle *S' n m;* il doit donc aussi faire un angle de réfraction plus grand.

A mesure que *S* se rapproche de la lentille, la divergence des rayons incidents et des rayons émergents augmente et le foyer conjugué *f* s'éloigne ; et si *S* coïncide avec le foyer principal *F'*, les rayons émergents sortent parallèles à l'axe, et il n'y a pas de foyer.

Si l'objet lumineux est à une distance de la lentille double de la distance focale principale, le foyer se fait à une distance égale, du côté opposé.

3. Foyer virtuel.—Lentilles biconvexes.—Quand l'objet lumineux *S* (fig. 78) est placé entre la lentille et le foyer

(Fig. 78).

principal, le *foyer est virtuel* et du même côté que l'objet lumineux. En effet, le rayon *S m* émis du point lumineux *S* placé entre le foyer *F* et la lentille formera, avec la normale *F' m N*, un angle plus grand que celui qui est formé par le rayon *F m*, émis du foyer principal: il

ne pourra donc rencontrer l'axe que par son prolongement en *f*.

Le foyer virtuel s'approche de la lentille en même temps que le point lumineux, et se confond avec lui quand il vient toucher la lentille.

(*b*). *Centre optique et axes secondaires.*

1°. Centre optique.—Le centre optique est un point qui, situé sur l'axe, jouit de cette propriété que tout rayon passant par ce point n'éprouve pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que le rayon émergent est parallèle au rayon incident.

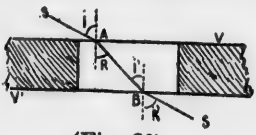
(Fig. 79).

Pour le démontrer, soit deux rayons de courbures parallèles *C M* et *C′ M′* (fig. 79) qui représentent les normales des rayons incidents *S M* et émergents *S′ M′*, ces deux rayons de courbure sont parallèles entre eux comme étant perpendiculaires aux deux plans tangents parallèles menés en *M* et *M′*. Tout rayon *S M* qui se propage dans la lentille, suivant *M M′*, traverse en réalité un milieu à faces parallèles *C M*, parallèle à *C′ M′*, et par conséquent sort sans déviation, c'est-à-dire suivant une direction *M′ S′* parallèle à *S M*. (Sachant que lorsque la

lumière traverse un milieu à faces parallèles, les rayons émergents, c'est-à-dire ceux qui sortent, sont parallèles aux rayons incidents).

Note explicative de la parenthèse. Milieux à faces parallèles.

Pour démontrer notre parenthèse, soit une glace de verre $V\ V'$ (fig. 80) à faces parallèles, $S\ A$ un rayon incident, $B\ S'$ le rayon émergent, i et r les angles d'incidence et de réfraction à l'entrée du rayon, et enfin i' et r' les mêmes angles à la sortie. En A la lumière éprouve une première réfraction dont l'indice est $\frac{\sin i}{\sin r}$. En B elle se réfracte une seconde fois, et l'indice est alors $\frac{\sin i'}{\sin r'}$. Or, on a vu (105) que l'indice de réfraction du verre à l'air, qui est égal à $\frac{2}{3}$, est le même que celui de l'air au verre renversé qui est égal à $\frac{3}{2}$



(Fig. 80).

On a donc : $$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\sin i'}{\sin r'} \text{ ou } \frac{3}{2} = \frac{3}{2}$$

Mais les deux normales en A et en B étant parallèles, les angles r et i' sont égaux comme alternes internes. Par conséquent, les dénominateurs des deux rapports ci-dessus étant égaux, il en est de même des numérateurs ; d'où l'on conclut que les angles r' et i sont égaux, et, par suite, que $S'\ B$ est parallèle à $S\ A$.

Ceci dit, revenons maintenant à la démonstration du centre optique (fig. 80). Le point O, où le rayon $S\ M$ coupe l'axe, est toujours le même quels que soient les

éléments M, M'. En effet, si les rayons $C\ M$ et $C'\ M'$ sont égaux, ce qui est le cas général,—les triangles $C\ M\ O$ et $C'\ M'\ O$ le sont aussi et l'on a $Co = C'o$; ce qui fait voir que, dans ce cas, le point O est milieu de CC'. Si les rayons $C\ M$ et $C'\ M'$ sont inégaux, les triangles $C\ M\ O$ et $C'\ M'\ O$ sont semblables et l'on a :

$$\frac{CM}{CO} = \frac{C'M'}{C'O}$$

d'où $\dfrac{CM - CO}{CO} = \dfrac{C'M' - C'O}{C'O}$ [1] ; mais nous avons

$CM - CO = ol'$ et $C'M' - C'O = ol$.

l'équation [1] deviendra donc :

$$\frac{ol'}{Co} = \frac{ol}{C'o} \quad \text{d'où} \quad \frac{ol'}{ol} = \frac{Co}{C'o} \quad [2]$$

Mais Co et $C'o$ sont égaux à R et R'
l'équation [2] deviendra donc

$$\frac{ol'}{ol} = \frac{R}{R'}$$

d'où, ajoutant au premier membre ol et au second R' nous aurons :

$$\frac{ol' + ol}{ol} = \frac{R + R'}{R'}$$

et en appelant e l'épaisseur $ol' + ol$ de la lentille et en remplaçant $ol' + ol$ par sa valeur e dans l'équation [3], nous aurons

$$\frac{E}{ol} = \frac{R + R'}{R} \quad \text{d'où } E\ R = (R + R')\ ol$$

$$\text{d'où} \quad ol = \frac{E\ R}{R + R'} \quad [4]$$

Dans le cas de la lentille biconvexe, dont les rayons de courbure sont égaux, on a

$$ol = \frac{1}{2} e$$

le centre optique se trouve au milieu de l'épaisseur de la lentille.

Si les rayons de courbure sont différents, le centre optique partage l'épaisseur e en parties proportionnelles à ces rayons.

Si la lentille est plan-convexe, R, qui représenterait le rayon correspondant au plan, est égal à l'infini et l'on a la valeur [4] qui devient :

$$ol = E \times \frac{\infty}{\infty} = E$$

le centre optique est alors situé sur la face courbe.

Dans les lentilles biconvexes on peut toujours déterminer le centre optique en tirant deux rayons de courbure parallèle $C\ M$ et $C'\ M'$ et en joignant leurs deux extrémités par une droite $M\ M'$, le point de rencontre de l'axe principal et de la droite $M\ M'$ est le centre optique.

2°. *Axes secondaires.*—On appelle *axe secondaire* toute droite qui, passant par le centre optique, ne passe pas par le centre de courbure ; les droites $A\ X$ et $A\ Y$ (fig. 81) sont les axes secondaires des points lumineux A et B.

(Fig. 81).

(c). *Constructions graphiques des images réelles et des images virtuelles dans les lentilles biconvexes.*

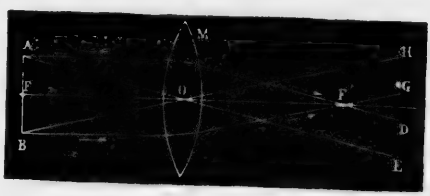
1°. *Images réelles,—lentilles biconvexes.*

Soit un objet lumineux $A\ B$, placé devant une lentille biconvexe (fig. 82), à une distance plus grande que la

distance focale principale. Menons les axes secondaires *A O* et *B O*, et du point *A* un rayon *A I* parallèle à l'axe

(Fig. 82).

principal. Le rayon, après avoir traversé la lentille, passe par le foyer principal *F'* et va former en *a*, à la rencontre des deux rayons secondaire *A O* et principal *A I* partant du même point lumineux *A*, l'image de *A*. Un rayon parallèle tiré du point *B* donnera de même en *b* l'image de *B* et nous aurons en *a b* l'image de *A B*, cette image est réelle et renversée.



(Fig. 83).

Si l'objet coïncide avec le foyer principal, l'image est à l'infini, c'est-à-dire nulle ; et, en effet, les rayons émis de *A* (fig. 83) donnent à l'émergence un faisceau parallèle à *A H*, de même de *B*, il n'y a donc plus concours des rayons à aucune distance, et par suite pas d'image.

2°. *Images virtuelles,—lentilles biconvexes.* — Soit l'objet *A B* (fig. 84) placé entre la lentille et son foyer principal

(Fig. 84).

F. Menons les axes secondaires *A O* et *B O*, le rayon incident *A I* parallèle à l'axe principl donne, après s'être réfracté deux fois, un rayon émergent *D E* qui va passer par le second foyer princpal *F'* et dont le prolongement rencontre l'axe secondaire *O A* en un point *a* qui est le foyer virtuel de *A*. Le foyer virtuel de *B* se formant de même en *b*, on a en *ab* l'image de *A B*. *Cette image est redressée, virtuelle et plus grande que l'objet.*

Les lentilles biconvexes prennent le nom de *loupes*.

(*d*). *Détermination graphique des foyers et des images dans les lentilles biconcaves.*

Les lentilles biconcaves ne forment que des foyers virtuels quelle que soit la distance de l'objet.

(Fig. 85).

(Fig. 86).

Soit des rayons *S*, *S'* (fig. 85) parallèles à l'axe. Le rayon *R I* se réfracte au point d'incidence *I* en s'approchant de la normale *C I*. Au point d'émergence *G*, il se réfracte de nouveau; mais en s'écartant de la normale *G C'* en sorte qu'il se brise deux fois dans le même sens pour s'éloigner de l'axe *C C'*. La même chose pour le rayon *S K'*. Ces rayons, après avoir traversé la lentille, forment donc des rayons divergents *G H* et *M N*, ils ne peuvent se rencontrer, il ne peut donc y avoir de foyer réel, mais les prolongements des rayons *G H* et *M N* se rencontrent sur l'axe principal en un point *F*, qui est le foyer virtuel principal.

Dans le cas où les rayons partent du point *L* (fig. 86), situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en *l* entre le foyer principal et le centre de la lentille.

(Fig. 87)

Images dans les lentilles biconcaves.—Ces lentilles ne donnent que des images virtuelles. En effet, soit un objet *A B* (fig. 87), tirons les axes secondaires *A O* et *B O*, tout rayon *A I* parallèle à l'axe principal se réfracte deux fois en *I* et en *E* pour s'écarter de cet axe, et le rayon émergent *E D* prolongé passe par le foyer principal, et le point *a* où il coupe l'axe secondaire *A O* est l'image virtuelle du point *A*. L'image du point *B* se construisant de même en *b*, on a en *ab* l'image de *A B*, *virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.*

109. Décomposition de la lumière blanche, spectre solaire.

Quand la lumière blanche, celle qui nous arrive du soleil, passe d'un milieu dans un autre, il n'y a pas seulement déviation, mais la *lumière est décomposée en plusieurs espèces de lumières*, phénomène indiqué par Newton et appelé *Dispersion*.

La décomposition de la lumière solaire en belle teinte de l'arc-en-ciel porte le nom de *spectre solaire* dont les principales teintes sont au nombre de sept, disposées à partir de la plus réfrangible dans l'ordre suivant :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Ces couleurs n'occupent pas toutes une étendue égale dans le spectre, c'est le violet qui a le plus d'étendue et l'orangé qui en a le moins.

110. Cause de la coloration des corps. — Couleurs complémentaires. (Déf.).

(*a*). *Cause de la coloration des corps.*—D'après Newton les corps décomposent la lumière par réflexion et leur couleur propre ne dépend que de leur pouvoir réfléchissant pour les différentes couleurs simples. Ceux qui les réfléchissent toutes sont blancs, et ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs. Entre ces deux limites extrêmes se présente une infinité de nuances. En sorte que les corps ne sont pas colorés par eux-mêmes, mais par l'espèce de lumière qu'ils réfléchissent. La couleur des corps varie avec la nature de la lumière.

(*b*). *Couleurs complémentaires.* — Newton a appelé *couleurs complémentaires* celles qui, réunies, forment du blanc. Le vert est complémentaire du rouge, le bleu de l'orangé, le violet du jaune.

111. Raies du spectre solaire.—Principe de l'analyse spectrale.

(*a*). *Raies du spectre solaire.*—Les diverses couleurs du spectre ne sont pas continues et, pour plusieurs degrés de réfrangibilité, les rayons manquent ; de là résultent,

dans toute l'étendue du spectre, un grand nombre de bandes obscures très étroites qu'on nomme les *raies du spectre.* Ces raies sont noires et parallèles aux arêtes du prisme. Traunhofer en a signalé huit principales qu'il a désignées par les premières lettres de l'alphabet en commençant par le rayon rouge.

La raie *A* est la limite du rouge.
" *B* est au milieu du rouge.
" *C* est à la limite du rouge et de l'orangé.
" *D* est dans le jaune.
" *E* est dans le vert.
" *F* est dans le bleu.
" *G* est ans l'indigo.
" *H* est dans le violet.

(*b*). *Principe de l'analyse spectrale.*—Plus tard on fit remarquer que les substances volatilisées dans une flamme fournissaient un moyen très sensible de reconnaître la présence de tel ou tel corps par la coloration qu'elles donnaient aux raies du spectre : les raies changeant de teinte, de position et de nombre pour chaque métal, donnèrent un nouveau procédé d'analyse, appelé *analyse spectrale,* dans lequel on expérimente à l'aide du *spectroscope.*

112. Aberration de réfrangibilité.— Achromatisme. (Notions).

(*a*). *Aberration de réfrangibilité.*—Certaines lentilles ont l'inconvénient, lorsqu'elles sont à une certaine distance de l'œil, de donner des images dont les contours sont irisés ; ce défaut, sensible surtout dans les lentilles convergentes, est dû à l'inégale réfrangibilité des couleurs simples et se désigne sous le nom *d'aberration de réfrangibilité.* Il résulte de cette dispersion que les lentilles ont réellement sept foyers distincts correspondant à cha-

(Fig. 88).

cune des couleurs du spectre. Les rayons rouges étant moins réfrangibles vont former leur foyer en un point *R* (fig. 88) et les rayons violets, se réfractant davantage, vont former le leur en *V* plus rapproché de la lentille, et c'est entre ces deux limites que se forment les foyers des autres couleurs qui en partant du rouge sont ceux de l'orangé, du jaune, du vert, bleu et indigo.

(*b*). *Achromatisme.*—On remédie à l'aberration de réfrangibilité au moyen de *l'achromatisme*, en combinant des prismes dont les angles réfringents sont différents, et qui sont formés de substances inégalement dispersives ; de cette façon on est parvenu à réfracter la lumière sans la décomposer, les objets vus ne sont plus irisés et on dit que ces prismes sont *achromatiques*, et l'on nomme *achromatisme* le phénomène de la réfraction de la lumière sans dispersion.

113. Microscope simple.—Microscope composé.

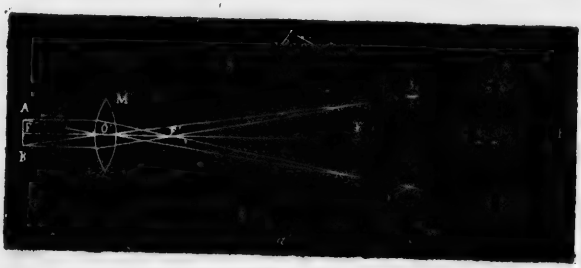
(*a*) *Microscope simple.* — Le microscope simple, ou loupe, est simplement une lentille convergente à court

(Fig. 89).

foyer, avec laquelle on regarde des objets placés en deça de son foyer principal.

Soit l'objet *A B* (fig. 89) placé en deçà du foyer principal *F* entre la lentille *O* et le foyer, cet objet donnera son image agrandie et droite en *A′* B′ ; si l'objet se rapproche de la lentille l'image diminue, et *vice versa*.

(*b*). *Microscope composé.* — Ce microscope est composé de deux verres lenticulaires convergents, l'un à court foyer, nommé *objectif*, celui qui regarde l'objet, et l'autre moins convergent, se nomme *oculaire*, parce qu'il est près de l'œil. Ces deux verres sont fixés dans un même tube.



(Fig. 90).

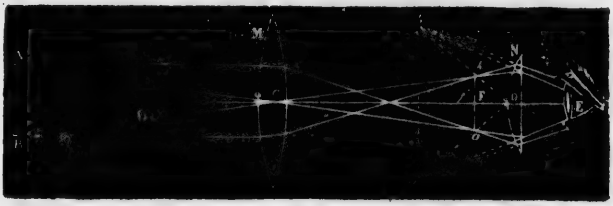
Marche des rayons.—Soit un objet *A B* (fig. 90) placé très près du foyer principal *F* de l'objectif *M*. Cet objectif formera de l'autre côté une image *ab* réelle renversée amplifiée et située beaucoup au delà du foyer principal *F′*. La distance des verres *M* et *N* est telle que l'image *ab* se trouve entre l'oculaire *N* et son foyer *F″*. Il en résulte que, pour l'œil placé en *E* qui regarde cette image avec l'oculaire, ce dernier verre produit l'effet du microscope simple, ou loupe, et substitue à l'image *ab* une seconde image *a′ b′* virtuelle et amplifiée de nouveau.

Cette deuxième image, droite par rapport à la première, est renversée par rapport à l'objet. D'après cela, le microscope composé ne serait autre chose qu'un mi-

croscope simple appliqué non plus à l'objet, mais à son image déjà amplifiée par une première lentille.

114. Lunette astronomique. — Lunette terrestre.— Télescope de Kenton modifié par Foucault.

(*a*). *Lunette astronomique.*—Cette lunette est destinée à

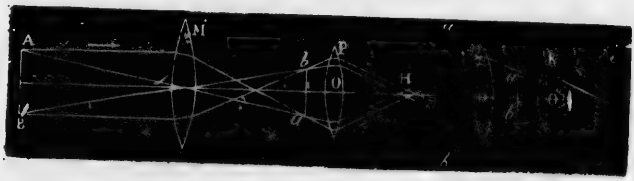


(Fig. 91).

l'observation des astres ; elle se compose d'un objectif et d'un oculaire. L'objectif *M* donne de l'astre *A B* une image *ab* renversée qui, vu la distance de *A B*, se forme au foyer principal *F* de l'objectif *M*. La distance des verres *M* et *N* étant réglée de façon que cette image se trouve entre l'oculaire *N* et le foyer principal *f* de ce verre, l'œil placé en *E* voit en *a' b'* une image virtuelle et amplifiée de l'image aérienne *ab*. Ce qui différencie le microscope de la lunette astronomique, c'est que cette dernière étant destinée à observer des objets très éloignés, il importe que l'objectif soit à grand diamètre en même temps qu'à grand rayon de courbure. Le grand diamètre lui permettant de recevoir plus de lumière de l'astre et par suite donnant plus d'éclat à l'image, et par le grand rayon de courbure l'aberration de sphéricité est moindre.

(*b*). *Lunette terrestre.*—La lunette terrestre, ou *longue-vue*, ne diffère essentiellement de la lunette astronomique que par les deux lentilles convergentes *P* et *Q* (fig.

92), qui sont placées entre l'objectif *M* et l'oculaire *R*, et placées dans le même tube que l'oculaire et à une distance constante de ce verre. Ces deux lentilles *P* et *Q* ont pour but de redresser les images.



(Fig. 92).

La *lunette de Galilée* ou *lunette de spectacle* est la plus simple des lunettes ; elle ne se compose que de deux verres, un objectif convergent (lentille biconvexe), et un oculaire divergent (lentille biconcave), et donne immédiatement une image redressée.

(*c*). *Télescope de Newton modifié par Foucault.*—Les télescopes sont des instruments qui servent à voir les objets éloignés et particulièrement les astres. Celui de Newton, dont Foucault modifia le miroir à cause des aberrations de sphéricité, ce qu'il obtint en donnant au miroir une surface parabolique au lieu d'une surface sphérique, est le plus connu de ces appareils.

(Fig. 93).

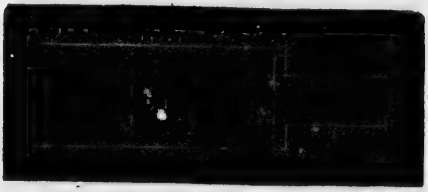
Le corps du télescope, qui est de bois, a la forme d'un tube octogonal ouvert d'un côté et fermé à son fond par le miroir de Foucault *M* (fig. 93) qui donnerait de l'astre une image réelle renversée *a b* un peu au delà du foyer principr Un prisme rectangulaire *P*, placé sur le trajet des rayons convergents qui formeraient cette image, leur fait éprouver, sur son hypothénuse, la réflexion totale (106), et ils vont former en *a' b'* une image très petite que l'on grossit au moyen de l'oculaire *O*.

115. Chambre obscure.—Lanterne magique.

(*a*). *Chambre obscure.*—La chambre obscure, ou chambre noire, est un appareil qui consiste en une boîte fermée de toutes parts à la lumière, excepté dans un point où une petite ouverture laisse pénétrer les rayons lumineux envoyés par les objets extérieurs, rayons qui donnent sur un écran une image de ces objets ; les images sont renversées.

Plus tard, Porta, physicien napolitain, imagina de remplacer la petite ouverture par une lentille convergente d'un plus grand diamètre et de recevoir l'image sur un écran placé au foyer de celle-ci; l'image gagne en éclat, netteté et sa grandeur augmente avec la distance focale, c'est-à-dire avec la grandeur de la lentille. On utilise la chambre noire dans l'art du dessin.

(*b*). *Lanterne magique.*—Cet appareil sert à projeter sur



(Fig. 94).

un écran des images amplifiées de petits objets ou de dessins peints sur une lame de verre avec des couleurs translucides. Il consiste (fig. 94) en une boîte *B*, qui contient une lampe réflecteur *L* et sur la paroi de laquelle est un tube *T* qui porte deux lentilles convergentes *l*, *l'*. La lentille *l'* sert à éclairer fortement les figures tracées sur la lame de verre *V*, placée devant la lentille *l*, à une distance un peu plus grande que la distance focale principale. Cette lentile projette une image réelle, renversée et très amplifiée des objets peints sur le verre ; alors il faut renverser le dessin pour que l'image soit droite.

116. Principe de la photographie.

On sait que la lumière produit, dans des conditions données, des actions chimiques sur les corps, actions desquelles il peut résulter des combinaisons de décompositions et notamment des changements de couleur. L'art d'obtenir les images des objets par l'action de la lumière a reçu le nom de *photographie*.

On distingue la photographie sur *plaque métallique*, sur *papier* et sur *verre*.

La photographie sur plaque ou *daguerréotypie*, du nom de son inventeur, Daguerre, consiste en cinq opérations :

1°. Polir une plaque de cuivre argentée sur laquelle doit se produire l'image ;

2°. Exposer cette plaque à des vapeurs d'iode de manière à former une *couche sensible* d'iodure d'argent, substance impressionnable à la lumière ;

3°. Exposer, pendant quelques minutes, la plaque ainsi préparée, dans la chambre noire, à l'action de la lumière à l'endroit de l'image focale de l'objet ;

4°. Exposer la plaque à des vapeurs de mercure à 75 degrés environ, qui forment un amalgame d'argent et de mercure qui donne les blancs de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires ;

5°. Fixer l'image, en enlevant l'iodure d'argent qui donne une teinte rougeâtre à l'épreuve ; cet iodure d'argent est celui qui n'a pas été altéré, et on l'enlève à l'aide d'une dissolution d'hyposulfite de soude.

Par la photographie sur papier ou sur verre, on obtient d'abord une épreuve dite *négative* qui a l'avantage de servir à tirer un grand nombre d'épreuves *positives*.

Pour l'épreuve négative, on recouvre la lame de verre d'une couche légère de collodion ioduré, qui avant qu'il soit sec, est plongé dans un bain d'argent ; il se forme de l'iodure d'argent, on expose dans la chambre noire, et l'image invisible apparaît par le lavage avec une solution d'acide pyrogallique, qui continue la réduction des sels d'argent, et qui est achevée dans un bain d'hyposulfite de soude, ce qui rend l'image inaltérable par la lumière.

L'épreuve négative obtenue est alors placée sur une feuille de papier sensible et on expose le tout au soleil, l'épreuve étant placée au-dessus. Les parties noires de l'épreuve interceptant la lumière, la feuille sensible prend des teintes opposées à celle du cliché et donne une image positive, qui peut être reproduite un grand nombre de fois.

117. Marche des rayons lumineux dans l'œil.

L'œil peut être comparé à une chambre obscure, dont la pupille est l'ouverture, le cristallin, la lentille convergente, et la rétine, l'écran sur lequel va se peindre l'image. L'effet produit est le même que celui par lequel se forme, au foyer conjugué d'une lentille biconvexe, l'image d'un objet placé en avant de la lentille (108-c).

Les rayons émis par les corps traversent les milieux réfringents de l'œil et vont former, sur la rétine, une image renversée, qui est une image très petite, réelle et renversée.

118. Cause du relief apparent des corps. — Stéréoscope.

(*a*). *Cause du relief apparent des corps.*—Il existe une différence essentielle entre la vision avec les deux yeux et la vision avec un seul œil ; ce n'est donc qu'avec les deux yeux qu'on peut avoir une perception nette du relief des corps ; c'est ce qu'il est facile de constater en regardant alternativement un même objet avec chaque œil, ce qui est dû à ce que, dans la vision avec les deux yeux, quand l'objet est à une faible distance, les deux axes devant converger vers l'objet, la perspective change pour chaque œil et que les deux images sont sensiblement inégales.

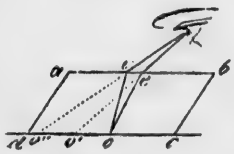
(*b*). *Stéréoscope.*—Le principe de cet appareil consiste à placer devant chaque œil une image différente d'un même objet et l'appareil est disposé de façon que l'œil droit, ne voyant que l'image qui lui est destinée, et l'œil gauche l'autre, les deux images se superposant, on obtient ainsi une perception tellement vive et distincte du relief, que l'illusion est complète et surprenante.

119. Double réfraction. (Exposé succinct du phénomène).

La double réfraction est la propriété que possèdent un grand nombre de cristaux de donner naissance, pour un seul rayon incident, à deux rayons réfractés ; d'où il résulte que lorsqu'on regarde un objet au travers de ces cristaux, on le voit double. Les cristaux qui possèdent la double réfraction sont dits *biréfringents.*

On explique la double réfraction par une inégale densité de l'éther dans les cristaux biréfringents, d'où résulte une vitesse de mouvement vibratoires plus rapide dans une certaine direction, qui est déterminée par l'état moléculaire du cristal. Ex. : le verre acquiert la propriété de devenir biréfringent par la trempe et par la compression.

Des deux rayons réfractés, l'un suit toujours les lois de la réfraction simple (104-b), c'est le *rayon ordinaire* donnant naissance aux *images ordinaires ;* l'autre n'est pas soumis à ces lois, c'est le *rayon extraordinaire* donnant naissance aux *images extraordinaires.*



(Fig. 95).

Pour démontrer la marche des rayons dans le phénomène de la double réfraction, soit le parallélogramme (fig. 95) *A B C D*, représentant la coupe d'un cristal de spath d'Islande, posons-le sur un carton, on remarque au travers un point noir *O* tracé sur le carton. Le rayon incident au point *O* se divise en deux rayons *O i* et *O e*, qui, se réfractant inégalement à l'émergence, donnent à l'œil deux images *O'* et *O''*.

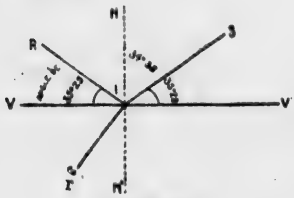
Si l'on tourne le cristal sur lui-même en le tenant toujours appliqué sur le carton, une des images reste fixe, c'est l'image ordinaire, tandis que l'image extraordinaire tourne autour de la première, ce qui indique que le plan du rayon réfracté se déplace par rapport au plan d'incidence, le rayon extraordinaire ne suit donc pas les lois de la réfraction simple.

120. Polarisation de la lumière, plan de polarisation. (Déf.) — Dans quels cas la lumière réfléchie est-elle complètement ou partiellement polarisée ?

(*a*). *Polarisation de la lumière, plan de polarisation.*—La polarisation est une modification particulière des rayons lumineux en vertu de laquelle, une fois réfléchis ou réfractés, ils deviennent incapables de se réfléchir ou de se réfracter de nouveau dans certaines directions. Pour expliquer cette nouvelle propriété de la lumière, on admet que les molécules lumineuses ont des pôles et des

axes qui, par la réflexion sous un certain angle, se tournent tous dans une même direction.

L'angle de polarisation est l'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.



(Fig. 96).

Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux *S I* tombe sur une glace *V V'* (fig. 96) sous l'angle de polarisation (35° 25'), il se partage en deux rayons, l'un *I R* qui est réfléchi dans l'air sous un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, et l'autre *I r* qui est réfracté dans le verre, perpendiculairement au rayon *I R*.

Le plan de réflexion dans lequel la lumière se trouve polarisée, est le plan de polarisation ; ce plan coïncide avec le plan d'incidence et contient l'angle de polarisation.

(*b*). *Dans quels cas la lumière réfléchie est-elle complètement ou partiellement polarisée ?*—La lumière se polarise, c'est-à-dire s'éteint par réflexion ou réfraction, et, réfléchie sur une glace de verre noire, la lumière se polarise lorsque la réflexion se produit sous un angle de 35° 25' avec la glace, la polarisation étant maximum, cet angle de 35° 25' est l'angle de polarisation. On reconnaît qu'il a subi cette modification à ce que ce rayon polarisé n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre sous le même angle de 35° 25' ; dans ce cas le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première et le rayon se trouve *polarisé* par le seul fait de sa réflexion. Si, au contraire, les deux plans de réflexion sont parallèles, il se réfléchit et l'éclat du rayon réfléchi est variable, et d'autant plus grand que les deux plans

approchent davantage du parallélisme ; dans ces positions intermédiaires le rayon est partiellement polarisé.

CHAPITRE DIXIEME.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

121. Electricité. (Déf.).—Electrisation par le frottement.—Bons et mauvais conducteurs.

(*a*). *Electricité.* — Un certain nombre de corps, frottés avec un morceau de drap ou une peau de chat, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, et ayant acquis cette propriété ils sont dits *électrisés*, et la cause de ce phénomène, dit *électrique*, est appelée *électricité*.

Les effets principaux de l'électricité sont des attractions et des répulsions, des phénomènes lumineux ou calorifiques, des commotions plus ou moins violentes, des réactions chimiques.

(*b*). *Electrisation par le frottement.* — Le frottement où le simple contact développe toujours simultanément, et en quantités égales, les deux électricités, l'une sur le corps frotteur, et l'autre sur le corps frotté.

Il existe deux corps différents d'électrisation, ou mieux, deux espèces d'électricités, et les corps se repoussent ou s'attirent suivant qu'ils sont chargés de la même électricité, ou d'électricités différentes.

Ex. : Si l'on frotte une tige de verre avec un morceau de soie, et que l'on approche cette tige de verre d'un corps léger (une balle de sureau) suspendu à un fil de soie, on voit que ce corps, attiré d'abord, est ensuite repoussé par le verre, mais que si, à ce moment, on en approche le morceau de soie avec lequel on a frotté le verre il y a attraction ; d'après cela nous voyons donc

qu'il y a deux états électriques, le premier, celui du verre, est appelé *positif*, le second, celui de la soie, est appelé *négatif*. Nous voyons aussi que deux électricités de mêmes signes positifs ou négatifs (le signe + indiquant l'électricité positive, le signe — l'électricité négative) se repoussent mutuellement, et qu'au contraire l'électricité positive attire l'électricité négative, et *vice versa*.

Lorsqu'on réunit, par un contact intime, les deux corps, c'est-à-dire le verre et la soie, qui s'étaient chargés, par leur frottement réciproque, d'électricités contraires, on constate que leur ensemble ne produit ni attraction, ni répulsion, ni aucun autre effet. Par conséquent, *les deux électricités développées sur deux corps frottés sont en proportion* telles, que, *lorsqu'on les réunit, leurs effets s'annulent mutuellement.* C'est-à-dire que les deux charges développées par le frottement sur deux corps en contact sont *égales* ou du moins *équivalentes*, puisqu'elles ne sont pas identiques.

Deux charges électriques (négative et positive) dont la somme paraît égale à *zéro* est souvent appelée une *couche double*. Quant à la quantité d'électricité, elle paraît plutôt provenir du contact plus ou moins parfait qu'il y a entre deux corps que de dépendre du frottement plus ou moins énergique ; en conséquence la seule chose à considérer dans l'énergie électrique, c'est la quantité plus ou moins grande d'électricité et son signe négatif ou positif sans rechercher si c'est de l'électricité de friction ou galvanique, c'est-à-dire s'il y a contact.

Un corps électrisé est capable d'en électriser un autre à distance, c'est le phénomène de *l'influence électrique* et le corps qui électrise prend le nom *d'inducteur* ou *de corps influençant*, tandis que le corps qui se trouve électrisé par l'influence de l'autre prend le nom de corps *induit* ou *influencé*.

Franklin a admis l'hypothèse que la cause de l'électricité était due à l'existence d'un seul fluide électrique impondérable, agissant par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière. Tous les corps contiendraient, à l'*état naturel*, une quantité bien déterminée de ce fluide et le frottement aurait seulement pour effet de faire passer d'un des corps frotteurs sur l'autre une certaine quantité du fluide. L'un se trouve donc finalement électrisé *plus* que dans son état normal et l'autre *moins*. On dit que le premier est électrisé *positivement* et le second *négativement*, d'où l'origine des expressions *positive* et *négative*.

(*c*). *Bons et mauvais conducteurs.*—Il y a des substances qui transmettent la propriété électrique, tels que les métaux. On dit que ces corps conduisent bien l'électricité ou qu'ils sont des corps *bons conducteurs ;* d'autres, au contraire, la retiennent fixée sur les points directement électrisés, on dit qu'ils conduisent mal l'électricité ou qu'ils sont des corps *mauvais conducteurs* ou *isolants*.

Cette classification n'est pas absolue, à vrai dire il n'y a pas de corps *parfaitement conducteurs*, c'est-à-dire transportant l'électricité à toute distance et instantanément, ni de corps *absolument isolants*, c'est-à-dire opposant une résistance complète à la propagation de l'électricité. Somme toute les corps sont *plus ou moins* conducteurs, *plus ou moins* isolants.

La terre étant un bon conducteur, pour conserver à un corps un état électrique il faut donc l'en isoler au moyen d'un corps mauvais conducteur ou isolant.

Ex. : le verre, le bois sec, les résines, etc., etc.

122. Enoncé des lois de Coulomb sur les attractions et les répulsions électriques. — Masses électriques, unités de masse. (Déf.).

(*a*). *Enoncé des lois de Coulomb sur les attractions et répulsions électriques.*

Les actions mutuelles entre les corps électrisés sont soumises aux deux lois suivantes :

1°. *Loi des distances.*—Les répulsions et les attractions qui s'exercent entre deux corps électrisés varient en raison inverse du carré de leur distance.

2°. *Loi des masses.*—A distance égale, ces mêmes forces sont proportionnelles au produit des masses électriques (c'est-à-dire des quantités d'électricité) répandues sur les deux corps.

(*b*). ***Masses électriques, unités de masse.***—Ne connaissant pas la nature de l'électricité, il est impossible d'évaluer, d'une manière absolue, la masse électrique qui a porté un corps à un état électrique donné. Il a donc fallu prendre un terme de comparaison qu'on a appelé *unité de masse électrique*.

On définit l'unité d'électricité *la quantité d'électricité qui exerce, à l'unité de distance, sur une masse ou quantité égale une répulsion égale à l'unité de force ou à une dyne.*

Note.—La *dyne* est la force constante en grandeur et en direction qui, agissant sur l'unité de masse, lui imprime l'unité d'accélération.

L'unité de masse = le gramme.

L'unité d'accélération = l'accroissement de vitesse de 1 centimètre par seconde.

L'unité de vitesse = La vitesse d'un mobile animé d'un mouvement uniforme qui parcourt 1 centimètre en 1 seconde.

D'après cela nous voyons que la *dyne* est la force qui, agissant sur l'unité de masse, recevrait du gramme une vitesse d'un centimètre par seconde.

En unité métrique la *dyne* vaut environ 1 milligramme poids.

Dans la formule : $f = \phi \frac{99^1}{d^2}$, si nous faisons ϕ

l'action de l'attraction ou de la répulsion à l'unité de distance pour une masse électrique égale à l'unité; *d* la distance de deux corps de masse électrique *q* et *q'* ; *f* leur action mutuelle d'attraction ou de répulsion, les deux lois ci-dessus se confondent dans la formule:

$$f = \phi \frac{qq^1}{d^2} \quad [1]$$

C'est-à-dire que la répulsion ou l'attraction f est proportionnelle au produit des masses électriques q et q' et inversement proportionnelle au carré de la distance d^2, le tout multiplié par ϕ représentant l'unité des attractions et répulsions à l'unité de distance.

Si les deux masses q et q' sont de même signe, la force est positive et il y a divergence ou éloignement, c'est-à-dire répulsion ; si elles sont de signe contraire, la force est négative et il y a convergence ou rapprochement, c'est-à-dire attraction.

Si $q = q'$ la formule [1] devient

$$f = \phi \frac{q^2}{d^2}$$

d'où, en extrayant la racine carrée des deux membres

$$\sqrt{f} = \sqrt{\phi} \frac{q}{d}$$ d'où pour la valeur de q :

$$q = d \sqrt{\frac{f}{\phi}}$$

$\phi = 1$ nous aurons :

$$f = \frac{qq^1}{d^2}$$

Ce qui nous donne la formule de l'*unité électro-statique* de quantité d'électricité.

123. Distribution de l'électricité à l'intérieur et à l'extérieur d'un conducteur.

Coulomb a été conduit par l'expérience au fait fondamental suivant :

Lorsqu'un corps conducteur et isolé est électrisé, l'électricité libre, positive ou négative se porte exclusivement à sa surface extérieure.

L'électricité libre forme une couche extrêmement mince à la surface des corps électrisés. Elle est retenue par le pouvoir isolant de l'atmosphère ambiante et elle tend sans cesse à s'en échapper avec un effort plus ou moins grand.

Coulomb a nommé *densité électrique* ou *charge électrique*, la quantité d'électricité répandue sur l'unité de surface ; en supposant une distribution uniforme, on peut l'évaluer en touchant successivement les différents points avec le plan d'épreuve que l'on porte chaque fois à la balance de Coulomb. La torsion du fil suspenseur sera plus ou moins grande suivant que la densité ou charge électrique elle-même sera plus ou moins grande.

Mais l'électricité répandue sur une surface donnée agit en chaque point sur le milieu ambiant dans lequel elle tend à se perdre; ce phénomène prend le nom de *tension électrique*.

La *tension électrique*, ou l'effort que l'électricité répandue dans une surface donnée exerce sur le milieu ambiant pour se dégager, est normale à la surface du conducteur et sensiblement proportionnelle au carré de la densité ou charge électrique en chaque point.

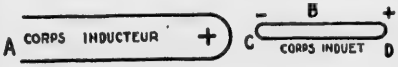
Sur une sphère, la densité électrique est la même en chaque point de la surface ; sur un ellipsoïde, la densité de cette couche ou sa charge électrique aux extrémités des axes est proportionnelle à leur longueur.

Dans le cas de l'ellipsoïde, le grand axe s'allongeant et la densité de la couche électrique étant proportion-

nelle à la longueur de l'axe, la tension augmentera en proportion, et il arrivera un moment où elle l'emportera sur la résistance de l'air et alors la charge se perdra dans l'espace ; cette propriété fut découverte par Franklin et montre qu'il est impossible de charger un corps muni d'une pointe.

124. Electrisation par influence. — Electroscope à feuille d'or.

(*a*). *Electrisation par influence.* — Un corps électrisé agit sur un corps à l'état neutre, c'est-à-dire que, décomposant l'électricité neutre, il attire l'électricité de nom contraire à celle qu'il possède et repousse celle de même nom ; on dit alors que le corps qui était d'abord à l'état neutre est maintenant électrisé par *influence* ou par *induction* et l'on nomme *induisant* ou *inducteur* le corps qui agit par induction, et *induit* celui sur lequel il agit.



(Fig. 97).

Soit le corps *A* la source de l'électricité qui influence le corps *B* et décompose l'électricité neutre de ce dernier : l'électricité est négative en *C* et positive en *D* (fig. 97).

Si l'on venait à supprimer l'influence *A*, les deux électricités du corps *B* se recombineraient et il redeviendrait à l'état neutre. Le corps *B* étant encore électrisé par influence, si on le touche en un quelconque de ses points avec une tige métallique ou le doigt, l'électricité de même nom que celle de l'inducteur *A*, c'est-à-dire la positive s'écoule dans le sol et l'électricité de nom contraire, c'est-à-dire la négative, est retenue par l'inducteur *A*. Dans le cylindre *B* c'est la négative qui reste, que l'on touche l'extrémité positive, la négative ou la partie médiane.

Si le cylindre *B* était mauvais conducteur, l'induction serait plus lente ; mais une fois qu'il serait électrisé par influence, il le serait encore longtemps après que l'action induisante en aurait été écartée, on dit alors que le corps influencé est *polarisé*.

Un corps conducteur électrisé, entouré complètement par un autre conducteur très proche y induit une quantité d'électricité contraire qui est égale à sa propre charge. Mais il n'y a pas d'induction quand c'est l'inducteur qui enveloppe l'induit, fait que Faraday a établi par voie exprimentale.

(*b*). *Electroscope à feuille d'or.* — On reconnaît qu'un

(Fig. 98).

corps est électrisé au moyen de petits instruments appelés électroscopes; le plus commode et le plus classique est l'électroscope à feuille d'or.

Cet appareil (fig. 98) se compose d'une tige de laiton *A* terminée en haut par une boule et en bas par deux feuilles d'or *f* et *f'*.

Opération et théorie.—Lorsqu'on approche lentement du bouton un corps chargé d'une électricité quelconque positive par exemple, cette électricité, décomposant par influence le fluide neutre du conducteur, l'électricité négative est attirée dans la boule et l'électricité positive repoussée vers les feuilles d'or *f*, *f'*. Celles-ci se trouvent chargées de la même électricité, se repoussent mutuellement et leur divergence prouve que le corps *B* est électrisé.

Pour reconnaître la nature de son électricité, on commence par charger l'électroscope avec le corps lui-même. Pour cela, tandis que l'instrument est sous l'influence du corps *B*, on touche le bouton *A* avec le doigt et on fait écouler dans le sol l'électricité de même nom que celui du corps *B* et la boule reste chargée d'une électricité *contraire* à celle du corps *B*. Les feuilles d'or retombent d'abord, toute l'électricité étant en *A* ; mais si l'on retire le doigt et ensuite le corps *B*, elles divergent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'électricité que conserve l'appareil.

On approche *lentement* de la boule un bâton de verre chargé positivement. Si la divergence des feuilles d'or augmente, c'est que l'électricité de la tige est repoussée à la partie inférieure, d'où l'on conclut qu'elle est de même espèce que celle du verre, c'est-à-dire positive. Si la divergence diminue, c'est que l'électricité de l'appareil est attirée par celle du verre ; elle est donc de nom contraire, c'est-à-dire négative.

Cet instrument est très employé.

125. Définition du potentiel par l'électromètre ou par le travail électrique.

L'expression de *potentiel* correspond à une propriété de l'électricité nettement distincte de la *masse électrique* de la *densité* ou *charge électrique* et de la *tension*, elle représente la capacité de travail du corps électrisé, capa-

cité qui est proportionnelle à son degré d'électrisation ; cette capacité de travail ou énergie potentielle est plus ou moins grande et appelée *potentiel électrique.*

On a coutume de comparer une source électrique quelconque à une machine élévatoire qui refoule de l'eau d'un réservoir inférieur dans un réservoir supérieur.

L'eau, ainsi refoulée dans le récipient supérieur, tend toujours, en vertu de la loi de la pesanteur, et d'après le principe des vases communicants, à revenir à son niveau primitif, c'est-à-dire à se mettre au même niveau que celui du vase inférieur. Cette tendance, qui est une véritable force, est d'autant plus grande que la différence de niveau est plus considérable, et cette force de l'eau, due à la pesanteur, en est le potentiel, c'est-à-dire sa capacité de travail, sa force électromotrice dont les effets seront d'autant plus intenses que le volume d'eau élevée sera plus grand.

Toutes les fois qu'un conducteur électrisé, relié par un fil fin avec un autre conducteur, cède ou prend de l'électricité positive à ce dernier, c'est qu'il a un potentiel *plus ou moins élevé* que lui ; toutes les fois qu'il n'y a pas transmission d'électricité de l'un à l'autre, c'est que le potentiel est le même sur tous les deux.

La force qui produit la différence du potentiel, cause de ces déplacements, est appelée *force électromotrice.*

On compare le potentiel de différents corps au moyen de la balance de Coulomb et on prend comme unité un certain angle de déviation donné par l'aiguille. L'angle, étant plus ou moins grand, indiquera un potentiel plus ou moins élevé par rapport à la charge qui sert de terme de comparaison. Une masse électrique agissant sur le milieu ambiant et son action s'exerçant suivant certaines directions appelées lignes de force, l'espace occupé par ces lignes de forces est appelé *champ électrique* du conducteur. Des masses électriques se mouvant

dans ce champ, il y aura un travail à faire qui variera avec l'énergie où le potentiel du conducteur, d'où la définition suivante du potentiel par le travail électrique.

Le potentiel d'un point quelconque d'un champ électrique est le nombre *d'ergs* qu'il faut faire pour y amener de l'infini l'unité de masse électrique positive. (L'erg est le travail qu'il faut faire pour élever un poids de 1 *dyne* à 1 centimètre de hauteur).

Dans un champ électrique le potentiel n'est pas partout le même ; cependant il y a des points qui ont même potentiel ; leurs surfaces sont appelées *surfaces équipotentielles* ou surfaces de *niveau électrique.*

On a donné au potentiel le nom de *niveau électrique* à cause du déplacement qui se fait des points à potentiel plus élevé à ceux moins élevé.

Pour exprimer la différence de potentiel, on prend le potentiel du sol comme terme de comparaison et tout corps, mis en communication avec le sol qui ne donne naissance à aucun courant, est dit au *potentiel zéro.* Il est à un potentiel positif si, mis à la terre, elle lui enlevait de l'électricité positive, et il est à un potentiel négatif si elle lui fournissait de l'électricité positive.

126. Capacité d'un conducteur. (Déf.). — Unité de capacité. (Déf.).—Condensateur, leur théorie.

(*a*). *Capacité d'un conducteur.* — Lorsqu'un corps électrisé est isolé dans l'espace, c'est-à-dire que les corps environnants sont assez éloignés pour ne pas l'influencer, son potentiel dépend uniquement de la charge électrique répandue sur sa propre surface, et lorsque la charge est en équilibre son potentiel est le même par tous ses points ; d'où *la capacité électrique* que l'on définit ainsi : " Le potentiel d'un conducteur électrisé en équilibre, et éloigné de tout autre conducteur, est proportionnelle à sa charge électrique." Le potentiel est à la charge élec-

trique ce que la température est à la quantité de chaleur que renferment les corps.

Numériquement, la capacité électrique est égale à la quantité d'électricité dont il faut charger le conducteur pour lui donner le potentiel égal à 1.

(*b*). *Unité de capacité.*—L'unité de capacité qu'on appelle *Farad* est la capacité d'un conducteur dont le potentiel augmente d'une unité lorsqu'on augmente sa charge d'une unité de masse électrique.

Pratiquement on en prend la millionième partie ou le *microfarad.*

(*c*). *Condensateurs, leur théorie.*—Les condensateurs sont des appareils qui servent à accumuler, sur des surfaces relativement petites, des quantités considérables d'électricité. Ils sont formés en principe de deux feuilles conductrices, chargées l'une d'électricité positive, l'autre d'électricité négative ; ces deux feuilles sont séparées par une lame d'un corps quelconque non conducteur qui s'oppose à la recomposition des fluides ; l'une des feuilles communique avec le sol et l'autre avec une source d'électricité (fig. 99).

Théorie.—Soit un plateau métallique *B* (fig. 102) supporté par une tige isolante et mis en communication avec une source d'électricité *S* positive. Ce conducteur *B* recevra de l'électricité jusqu'à ce que son potentiel égale celui de la source *S* et que cette électricité se distribue également sur ses deux faces. Supprimons maintenant la communication du plateau *B* avec la machine, rien ne change ; mais approchons lentement le plateau *A*, son électricité neutre étant dé-

(Fig. 99).

composée par l'influence de *B*, l'électricité négative se porte sur la face *n* et la positive s'écoule dans le sol. Or, l'électricité du plateau *A* réagissant à son tour sur l'électricité positive du plateau *B*, l'électricité de ce dernier cesse d'être également distribuée sur ses deux faces et se rend en partie sur la face *m*, la tension diminue donc en *p* ; mais si l'on rétablit la communication de *B* avec la machine *S*, le potentiel de la face *p* étant moins élevé que celui de la source *S*, l'équilibre tendra à s'établir et une nouvelle quantité passera de *S* en *p*, qui, à son tour, décomposera par influence une deuxième quantité d'électricité neutre sur le plateau *A*. Donc nouvelle accumulation d'électricité négative en *n* et d'électricité positive en *m*. Mais aussi, d'un autre côté, il y aura une limite à cette accumulation, car chaque fois que la machine *S* cède de l'électricité au plateau *B*, une partie seulement passe sur la face *m* du plateau, l'autre restant en *p* et le potentiel sur cette face va toujours en augmentant jusqu'à ce qu'il égale celui de la source *S*, alors il y aura équilibre et l'électricité accumulée sur les deux faces *m* et *n* est considérable.

Le conducteur étant chargé, on rompt les communications avec le sol et la machine, en enlevant les deux chaînes. Le plateau *A* est chargé d'électricité négative sur la face *n*, l'autre étant à l'état neutre à cause de la communication qu'elle avait avec le sol ; le plateau *B* au contraire est chargé d'électricité positive, inégalement, en ayant plus sur la face *m* que sur celle de *p*, le potentiel de cette dernière étant égal à celui de la machine. Le rôle de la lame de verre *C* qui se trouve entre les deux plateaux sert à empêcher la combinaison des deux fluides tout en n'empêchant pas leurs actions par influence.

Lorsqu'on veut décharger instantanément le conden-

sateur, il suffit de mettre les deux plateaux en communication au moyen d'un *excitateur*.

Un condensateur à grande surface peut donc accumuler une énergie énorme et produire des effets très violents. La bouteille de Leyde est le type des condensateurs le plus répandus.

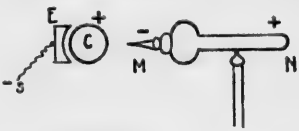
127. Machines électriques. (Déf.). — Une machine à induction ou à frottement ; donner sa théorie.

On appelle machines électriques des sources d'électricité à haut potentiel ; on en distingue deux espèces, celles à frottement et celles à induction.

(*a*). *Machines électriques à induction.* — Au moyen de cette machine, il s'agit d'électriser par influence un conducteur donné ; pour cela on approche du conducteur un inducteur électrisé. Sous l'influence de l'inducteur, l'induit manifeste les deux états électriques, positif et négatif, il n'y a donc plus qu'à lui enlever une de ses charges pour que l'autre apparaisse ; pour cela on met l'induit en communication avec le sol, comme dans l'électrophore, ou en l'armant de pointes par où s'écoule la charge dont on veut se débarrasser.

L'énergie sera plus ou moins grande suivant que l'on rapproche ou que l'on éloigne l'induisant de l'induit.

(*b*). *Machines électriques à frottement.*—Soit un cylindre *C* tournant autour de son axe (fig. 100), en frottant sur un coussin *E* qui, lui, communique avec le sol *S*. Le frottement charge la moitié de la surface *C* positivement, l'électricité négative se perdant dans le sol. Cette charge agit par induction sur le conducteur *M N* isolé, l'électricité négative est attirée en *M* et la positive repoussée en *N*. L'électricité négative s'échappe en *M*, tombe sur le cylindre, ce qui



(Fig. 100).

fait que la partie inférieure de ce dernier est toujours à l'état neutre et prête à être électrisée de nouveau par le frottement *E*. Il ne reste donc sur *M N* que la positive qui se manifeste par les phénomènes ordinaires.

128. Théorie chimique de la pile à un seul liquide, à deux liquides ou à liquide dépolarisant.

Toute réaction chimique exothermique s'accompagne d'une différence de potentiel sur les corps qui réagissent. C'est ainsi que, si l'on plonge une lame de zinc pur dans de l'eau acidulée, le zinc et l'eau prennent des potentiels différents, en même temps qu'une action chimique se produit entre ces deux corps ; cette action chimique entre le zinc et l'eau cesse d'ailleurs au moment où la différence des potentiels atteint une certaine valeur. Mais si le zinc et l'eau sont réunis extérieurement par un conducteur, c'est-à-dire si le circuit est fermé, ce circuit est traversé par un courant continu dû à la différence constante de potentiel que les corps en présence, qui constituent un *élément* de pile, maintiennent sur les deux pôles, zinc d'une part et eau de l'autre. On constate, en outre, que, dans ces conditions, l'action chimique se manifeste aussi longtemps que les pôles de l'élément sont réunis l'un à l'autre.

Le circuit interpolaire est généralement constitué par un corps inattaquable plongé dans le liquide, platine, charbon (pile de Bunsen), etc., et par un fil métallique qui réunit ce corps au métal attaqué.

(Fig. 101).

Soit (fig. 101) un élément de zinc, eau acidulée et cuivre, inégalement attaquable par l'acide, l'action chimique se produisant, le métal le plus attaqué est chargé négativement hors du liquide et celui qui ne l'est pas est chargé positivement, pour l'intérieur de l'élément, le *Zn* est le pôle positif et *Cn* le pôle négatif. L'énergie produite dans le liquide pro-

vient de l'action chimique suivante, décomposition de $So^4 H^2$, l'hydrogène H^2 de l'acide se dégage sur le cuivre et le radical So^4 sur le zinc pour former du sulfate de zinc ($Zn\ So^4$).

Supposons maintenant les deux pôles réunis, l'électricité passera de la lame de cuivre à la lame de zinc, mais l'action chimique se continuant, le courant électrique continue ; il se forme donc du sulfate de zinc et de l'hydrogène qui se dégage uniquement sur la lame de cuivre, sur laquelle il forme bientôt une véritable enveloppe gazeuse qui offre une résistance au passage du courant électrique du zinc au cuivre dans le liquide et qui de plus finit par être une soruce électromotrice contraire à celle de la source primitive. C'est ce qu'on appelle la *polarisation des électrodes.* En conséquence, si l'on veut avoir un courant constant d'électricité, il faut se débarrasser de l'hydrogène, ce qu'on obtient par les piles à *deux liquides* ou à *liquides dépolarisant.*

Les piles à deux liquides sont appelées *piles à courant constant*, car le courant d'une pile sera constant, ou du moins sensiblement constant, si l'on fait en sorte que l'hydrogène soit engagé dans une combinaison différente de celle qui détermine la force *contre-électromotrice* ou *polarisation.* Pour cela on fait passer l'hydrogène à travers des solutions qu'il décompose. Ex. de piles à courant constant :

Elément Daniel.—La constitution de cet élément de force électromotrice égale à 1.88 volt est la suivante :

Zinc	Eau acidulée par $So^4 H^2$	Vase poreux	Solution de So^4 Cn	lame de Cn

l'hydrogène de $So^4 H^2$ se substitue à Cn de $So^4 Cn$ dans l'intérieur de la paroi du vase poreux où les deux liquides se rencontrent, et il se dépose Cn sur la lame de cuivre ; il ne peut donc se produire aucune réaction

capable de donner lieu à une force contre-électromotrice.

Elément Bunsen.—Cet élément, dont la force électromotrice est de 1.8 volt, se compose de :

Zinc	Eau acidulée par $So^4\ H^2$	Vase poreux	Solution de $Azo^3\ H$	Cylindre de charbon

L'hydrogène de $So^4\ H^2$ décompose l'acide azotique $A\,zo^3\ H$ pour former de l'eau $H^2\ O$ et met en liberté de l'acide hypoazotique ($A\ zo^2$, peroxyde d'azote) qui se dégage sans polariser l'élément.

Elément au bichromate de potasse.—Cet élément est constitué par l'eau acidulée, additionnée de bichromate de potasse, dans laquelle plongent des lames de zinc et de charbon. Le corps dépolarisant, bichromate de potasse $Cz^2\ O^7\ K^2$ sel très riche en oxygène, est ici mélangé à l'eau acidulée; l'hydrogène mis en liberté réduit le bichromate et il se forme de l'oxyde de chrome.

Cet élément est le plus fréquemment employé, sa force électromotrice est en moyenne de 2 volts.

Ces piles portent le nom de *piles hydroélectriques.* Dans la construction des piles on fait toujours usage du zinc amalgamé, car avec le zinc ordinaire l'attaque de l'acide par le métal se produit même lorsque le circuit extérieur est ouvert, et le zinc se recouvre de bulles d'hydrogène ; faits qui sont dus aux impuretés du zinc et aux courants locaux qui prennent naissance ; il y a par suite une dépense d'action chimique dont on ne recueille pas l'équivalent sous forme de courant dans le circuit extérieur. La pile, en d'autres termes, s'use sans profit.

129. Qu'entend-on par courant électrique ?—Enoncé des lois de Ohm et de Youle.

(*a*). *Qu'entend-on par courant électrique ?* — Les deux pôles d'une pile électrique étant réunis par un fil conducteur, ce conducteur possède des propriétés particulières

qui se manifestent par des effets calorifiques, lumineux, mécaniques, magnétiques, physiologiques, etc., etc. C'est la cause de ces phénomènes qu'on appelle *courant électrique*. Ce courant a un déplacement qui se fait du potentiel le plus élevé au potentiel le moins élevé, c'est-à-dire du pôle positif au pôle négatif. Pour que le courant continu existe il faut que le circuit soit complet.

(*b*). *Loi de Ohm.*—De la grandeur ou intensité d'un courant dépendent les actions diverses qu'il produit et cette intensité dépend elle-même de la force électromotrice qui produit le courant et de la résistance plus ou moins grande qu'il rencontre sur son passage, d'où la loi de Ohm.

Loi.—L'intensité I d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice E et inversement proportionnelle à la résistance électrique R du circuit, d'où la formule

$$I = \frac{E}{R} \quad [1]$$

d'un autre côté, la résistance R est proportionnelle à la longueur l du fil et inversement proportionnelle à sa section S et à son pouvoir conducteur C, d'où la formule

$$R = \frac{l}{cs} \quad [2]$$

Si, dans l'équation [1], nous remplaçons R par sa valeur, nous aurons :

$$I = \frac{E\,C\,S}{l}$$

Pouillet montra par l'expérience que le produit de l'intensité du courant I par la résistance du circuit R, c'est-à-dire la résistance extérieure et celle de l'électromoteur r, c'est-à-dire la résistance intérieure, est un nombre constant pour un même élément de pile supposé invariable, c'est-à-dire que

$I\ (R + r) = I'\ (R + r') = I''\ (R + r'') =$ constante et si l'on appelle E la valeur de ce produit, c'est-à-dire sa force électromotrice, nous aurons :

$$E = (R + r)\ I$$

d'où

$$I = \frac{E}{R + r}$$

la valeur $R + r$ représente la résistance totale de la pile.

(*c*) *Loi de Youle.*—Si le courant ne produit aucun travail extérieur, ni aucune décomposition chimique autre que celle de la pile qui lui donne son énergie, cette énergie apparaît sous forme de chaleur. Phénomène qui fut étudié par Youle au moyen du calorimètre, d'où la loi de Youle.

Loi.—L'énergie calorifique dégagée dans un conducteur pendant l'unité de temps est égale au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance du conducteur R, d'où, en appelant J, l'énergie calorifique, nous aurons:

$$J = I^2 R$$

Ce qui indique que partout où les fils s'échauffent il y a perte d'énergie et que, pour augmenter la chaleur en un point du circuit, il suffit d'augmenter le courant général ou bien la résistance en un point. C'est le principe des lampes électriques et des appareils de chauffage ; il suffit pour cela de créer en un point du circuit une résistance plus grande, le conducteur s'y échauffe à une haute température et devient lumineux.

130. Phénomènes généraux de l'électrolyse des composés binaires et ternaires.—Enoncé de la loi de Faraday.—Piles secondaires, accumulateurs.—Galvanoplastie, dorure et argenture.

(*a*). *Phénomènes généraux de l'électrolyse des composés binaires et ternaires.*—Les piles et les machines électriques

sont les deux sources auxquelles l'industrie demande l'électricité dont elle a besoin, et qu'elle utilise sous forme de *courant électrique.*

On nomme ainsi le flux continu d'électricité qui, partant de l'appareil, pile ou machine, qui lui donne naissance, circule à travers des conducteurs jusqu'aux divers points où il est utilisé pour revenir ensuite par des conducteurs analogues à l'appareil générateur.

Le chemin ainsi parcouru par le courant est le *circuit.*

Pour que le courant se produise, il faut que le circuit ne présente aucune solution de continuité, qu'il soit *fermé.* Dans le cas contraire, on dit que le circuit est ouvert et alors le courant ne se produit pas.

Les *conducteurs,* ou fils conducteurs, sont généralement des fils de cuivre, le plus souvent recouverts d'une matière isolante, gutta-percha par exemple.

Le *pôle positif* de l'appareil générateur est le point par lequel le courant sort de cet appareil, on l'indique par le signe +, le *pôle négatif* est le point par lequel le courant rentre dans l'appareil, il se désigne par le signe —

La partie du circuit comprise entre ces deux points, en dehors de l'appareil générateur s'appelle *circuit intérieur.*

L'une des propriétés les plus remarquables du courant électrique, celle sur laquelle sont basées toutes les opérations électrochimiques et galvanoplastiques, est la suivante :

" Lorsqu'un courant électrique assez puissant traverse un liquide et en particulier une dissolution, le métal se dépose d'un côté tandis que les autres éléments du sel se portent de l'autre."

Ainsi, si l'on met en communication, chacun par un conducteur, les pôles positif et négatif d'une pile, avec une dissolution d'un sel ou d'un liquide (le mercure ex-

cepté), le courant venant du pôle positif traversera le liquide en le décomposant, et rentrera dans la pile par le pôle négatif.

Ce phénomène de la décomposition a reçu le nom *d'électrolyse* et le liquide décomposé le nom *d'électrolyte.*

On appelle *électrodes* les extrémités des conducteurs plongeant dans le bain. L'électrode positive s'appelle *anode* et l'électrode négative *cathode.* C'est à la cathode qu'on attache les objets destinés à recevoir le dépôt du métal précipité par le courant.

Electrolyse des composés binaires.—Les courants exercent sur tous les composés binaires conducteurs la même action que sur l'eau ; dans l'eau l'hydrogène étant le métal se rend au pôle négatif, et l'oxygène le radical, au pôle positif.

Oxydes métalliques.—Ils sont tous réduits, l'oxygène se dégage au pôle positif, le métal au pôle négatif.

Hydracides. — Dans les hydracides, tels que l'acide chlorhydrique (*H c l*), l'hydrogène se porte au pôle négatif et le radical chlore *cl* au pôle positif.

Sels haloïdes.—Dans les chlorures, bromures et iodures, le métal se dépose au pôle négatif et le radical chlore, brome et iode au pôle positif.

Composés ternaires.—Avec le sulfate de cuivre So^4 *Cn*, sous l'action du courant le cuivre va au pôle négatif et So^4 au pôle positif ; mais alors So^4 décompose l'eau, il se forme de l'acide sulfurique So^4 H^2 avec dégagement d'oxygène ; phénomène qui se complique d'actions secondaires aux électrodes, à moins que l'électrode ne soit en métal inaltérable, comme le platine ; si, au contraire, elle est en cuivre, So^4 se combine avec un atome de cuivre de l'électrode positive et So^4 *Cu* se reproduit de façon que l'électrolyte garde toujours la même concentration. C'est ce qu'on appelle l'électrode soluble de la galvanoplastie.

(*b*). *Enoncé de la loi de Faraday.*—La quantité de l'électrolyte décomposée dépend uniquement de la quantité d'électricité qui passe.

Loi.—L'unité de quantité d'électricité décompose toujours $\frac{1}{96600} = 0{,}00001035$ de l'équivalent chimique en poids de l'électrolyte que traverse le courant.

L'équivalent est exprimé en grammes et rapporté à celui de l'hydrogène pris pour unité.

Sachant que l'unité d'électricité (l'unité de quantité) dépose environ un milligramme d'argent par seconde, nous avons là un moyen de mesurer un courant. En conséquence, si un courant, pendant une seconde, dépose 2, 3... milligrammes d'argent, sa force est de 2, 3... unités de courant, et connaissant la quantité de métal à déposer dans un temps donné (c'est-à-dire 1 milligramme d'argent par seconde) il est facile de calculer la force du courant qui permettra d'atteindre ce but.

(*c*). *Piles secondaires, accumulateurs.*—De la Rive constata que des lames de platine, ayant servi à transmettre le courant d'une pile ordinaire, dit *courant primaire*, dans un liquide décomposable, puis étant retirées de ce liquide et plongées dans de l'eau distillée, donnaient naissance à un nouveau courant qui est *inverse* du courant primaire et qu'on appelle *courant secondaire* ou *courant de polarisation*. On démontra plus tard que cette force électromotrice inverse était due à des couches de bulles d'oxygène et d'hydrogène, déposées et accumulées respectivement sur chaque lame, c'est ce que nous avons vu dans la polarisation de la pile à lame de cuivre.

Planté chercha à utiliser les courants secondaires et constitua des accumulateurs qu'il appela *piles secondaires* ou accumulateurs, parce qu'elles *accumulent* l'électricité sous la forme de produits chimiques résultant

du passage des courants primaires. Pour cela, il substitua aux électrodes en platine, des électrodes en plomb, ayant constaté que la force électromotrice secondaire qui leur correspondait était plus grande que celle de tous les autres métaux, et en accroissant la surface des électrodes de manière à en diminuer la résistance, on obtient un accumulateur d'une grande puissance.

Voici ce qui se passe pendant la charge d'un accumulateur ; la lame positive se recouvre de bioxyde de plomb et la lame négative reste à l'état de plomb ou se réduit si elle était déjà oxydée, et après sa décharge les deux lames de plomb sont recouvertes de sulfate de plomb.

$$\overbrace{Pb + 2\,So^4\,H^2 + \underset{+}{Pb\,O^2}}^{\text{Etat du plomb pendant la charge}} = \overbrace{\underset{+}{Pb\,So^4} + 2\,H^2\,O + \underline{Pb\,So^4}}^{\text{Etat du plomb après la décharge}}$$

Si, maintenant, le courant de charge passe à nouveau, il change $Pb\,So^4$ de la plaque positive en $Pb\,O^2$ et réduit à l'état métallique $Pb\,So^4$ de la plaque négative, faisant ces opérations de charges et de décharges à plusieurs reprises, la lame de plomb se recouvre d'une couche poreuse et par conséquent donne une plus grande surface de métal, et l'appareil devient plus propice ; c'est justement à cause de la porosité que peut acquérir le plomb, ce qui lui donne une plus grande puissance d'emmagasinement à volume égal et surtout à poids égal, que l'on a choisi ce métal pour faire des accumulateurs.

Dans la pratique, on met un grand nombre de ces plaques dans un même vase en les réunissant de deux en deux de chaque côté, puis l'on fait communiquer l'un de ces groupes avec un pôle et l'autre avec l'autre pôle d'une source d'un courant primaire.

Les accumulateurs servent surtout dans les installations d'éclairage électrique.

(*d*). *Galvanoplastie, dorure, argenture.*—Ces trois opéra-

tions ne sont que des applications de l'électrolyse et on donne plus spécialement le nom de galvanoplastie à la déposition du cuivre que l'on fait se produire sur un objet. Pour cette opération, on suspend au pôle négatif dans un bain de sulfate de cuivre l'objet à cuivrer ; au pôle positif on accroche une lame de cuivre qui maintient le bain au même degré de concentration et on fait passer le courant jusqu'à ce que le dépôt métallique ait l'épaisseur voulue.

Electrotypie.—L'électrotypie est l'opération qui a pour but de recouvrir de cuivre l'empreinte d'une gravure sur bois, sur cuivre ou obtenue par la photographie, ce qui donne un cliché galvanique servant à obtenir de nombreuses reproductions de la gravure au moyen des presses typographiques.

Electrochimie. — La dorure, l'argenture, etc., etc., galvanique constituent l'électrochimie ; elles comportent diverses opérations préliminaires ayant pour but de nettoyer avec beaucoup de soin les objets à dorer ou à argenter (décapage, dérochage) afin que le dépôt soit bien adhérent, puis on les plonge dans le bain de sel d'or ou d'argent comme pour le cuivrage.

131. Courants thermo-électriques. (Déf.). — Leur production, leurs caractères.

(*a*). *Courants thermo-électriques.* — De même que les courants engendrent de la chaleur, celle-ci, dans certaines conditions, peut engendrer des courants ; ces courants sont appelés *thermo-électriques* pour les distinguer des courants *hydro-électriques* qui sont dus aux actions chimiques.

Le principe de ces courants est le suivant : si l'on chauffe ou si l'on refroidit le point de jonction de deux pièces métalliques, il se produit dans ces métaux un courant électrique. Il n'est point indispensable d'opérer sur deux métaux différents ; tordez par exemple un fil

de cuivre à un certain endroit et chauffez la partie voisine, vous constaterez la production d'un courant dans ce fil. Le courant est dû à la différence d'état moléculaire des diverses parties, et, par suite, à la différence de résistance que les diverses portions du métal opposent à la chaleur et à l'électricité.

Plus cette différence sera grande, plus aussi le courant développé sera intense et la force électromotrice élevée. C'est pourquoi, au lieu d'un seul métal, on en emploie ordinairement deux dont on chauffe le point de jonction.

Le bismuth et l'antimoine sont les deux métaux dont la réunion développe la force électromotrice la plus grande. Ce couple a l'avantage d'avoir une force électromotrice sensiblement proportionnelle à la différence de température des deux soudures entre 0° et 100° ; pour un couple de ce genre et une différence de température des soudures égale à un degré centigrade, elle varie de 0,000057 volt par degré.

C'est sur ce principe qu'est construite la pile de Mellone ou *pile thermomultiplicateur* plus sensible à la chaleur que le meilleur thermomètre ordinaire ; on s'en sert pour l'étude des phénomènes délicats du calorique. Le bismuth est toujours positif par rapport à l'antimoine.

(*b*). *Leur production, leurs caractères.* — Les courants thermo-électriques sont constants quand les soudures demeurent à une température invariable et que la différence de température entre deux séries de soudures reste en deça de certaines limites, lesquelles changent d'ailleurs avec les métaux soudés.

Les courants thermo-électriques ont une très faible tension, mais la résistance intérieure de ces piles étant beaucoup plus faible que celle des piles hydro-électriques, on peut en obtenir des courants assez intenses.

Les courants thermo-électriques ont les mêmes propriétés que les courants hydro-électriques.

132. Aimants naturels, artificiels. (Déf.). — Pôles, lignes neutres. (Déf.).—Enoncé de la loi de Coulomb sur les actions magnétiques. — Champ magnétique, lignes de force. (Déf.).

(*a*). *Aimants naturels, artificiels.* — On nomme *aimants* des substances qui ont la propriété d'attirer le fer.

On distingue l'*aimant naturel* ou *pierre d'aimant* qui est un oxyde de fer salin, ou oxyde magnétique de fer $Fe^3 O^4$ ($Fe O, Fe^2 O^3$) minerai de fer très abondant dans les terrains anciens, principalement en Suède et Norvège.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux ou des aiguilles d'acier trempés qui possèdent les mêmes propriétés générales que les aimants naturels, on les leur a communiquées en les frottant avec la pierre d'aimant.

(*b*). *Pôles, lignes neutres.* — Si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on en voit une grande quantité adhérer vers les extrémités sous la forme de houppes hérissées, mais l'adhérence de la limaille décroît rapidement à mesure qu'on s'éloigne des extrémités jusqu'à la médiane du barreau où elle est nulle ; cette dernière région a reçu le nom de *ligne neutre* et les régions où se manifeste le maximum d'attraction se nomment *pôles.*

Parfois, il se produit des pôles contraires, alternés entre les pôles extrêmes, c'est ce qu'on appelle des *pôles secondaires* ou *points conséquents.*

Pour la distinction des pôles, on suspend deux barreaux aimantés de façon qu'ils puissent tourner dans un plan horizontal ; on les voit s'orienter d'eux-mêmes, l'une de leurs extrémités se tourner vers le pôle nord géographique et l'autre vers le pôle sud. Rapprochons

maintenant l'une de l'autre les extrémités qui se dirigent vers le nord ou celles qui se dirigent vers le sud, elles se repoussent ; au contraire, rapprochons d'une extrémité sud une extrémité nord, elles s'attirent, d'où la loi suivante :

" Les pôles de même nom se repoussent et les pôles de noms contraires s'attirent."

(*c*). *Enoncé de la loi de Coulomb sur les actions magnétiques.*

Les phénomènes d'attraction et de répulsion magnétique sont exprimés par la loi suivante due à Coulomb.

Loi.—Deux pôles magnétiques s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leur distance et en raison directe du produit de leurs masses magnétiques.

L'unité de masse électrique est celle qui, agissant sur une autre masse égale à elle-même et à l'unité de distance, la repousse où l'attire avec une force égale à une dyne.

On exprime la loi de Coulomb par la formule suivante :

$$F = \frac{m\,m^1}{d^2}$$

dans laquelle F représente l'attraction ou la répulsion

$m\,m^1$ = les deux masses

d = la distance qui sépare les deux masses,

quand la force F est répulsive sa valeur est positive (car alors m et m' sont de même signe)—quand elle est attractive, elle a le signe — (et sa valeur est négative car m et m' sont des signes contraires).

Ce fut au moyen de la balance de torsion que Coulomb démontra cette loi.

(*d*).—*Champ magnétique ; lignes de force.* — Une substance magnétique mise en contact avec un barreau aimanté devient un aimant complet, ayant deux pôles et

une ligne neutre, c'est ce phénomène qui permet d'expliquer la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants. Les parcelles qui sont en contact avec l'aimant deviennent autant de petits aimants et agissent par influence sur les parcelles voisines ; celles-ci agissent de même sur les suivantes et ainsi de suite jusqu'à une certaine distance où l'influence finit par s'annuler.

L'aimantation par influence se produit donc ainsi à distance, mais avec d'autant plus d'intensité que cette distance est plus faible et que l'aimant est plus fort. C'est ainsi qu'on produit les figures symétriques appelées *fantômes* ou *spectres magnétiques*, qui sont des courbes que l'on obtient à l'aide de la limaille de fer qui, sous l'influence des pôles de l'aimant, se dispose en courbes régulières allant d'un pôle à l'autre.

Ce sont ces courbes qui donnèrent à Faraday l'idée des *lignes de forces*, qui sont les lignes suivant lesquelles s'exercent les attractions et les répulsions magnétiques. La portion de l'espace dans laquelle s'exerce l'action attractive ou répulsive d'un pôle d'aimant, a été appelée le *champ magnétique* de ce pôle, elle est plus ou moins étendue suivant que le pôle est plus ou moins fort.

133. Un procédé d'aimantation.

Le procédé d'aimantation le plus simple consiste à frotter le barreau à aimanter avec le pôle d'un fort aimant. Le frottement doit se faire d'un bout à l'autre du barreau à aimanter sans arrêt, toujours dans le même sens et successivement sur les différentes faces du barreau à aimanter. On développe ainsi à l'extrémité du barreau à aimanter, que l'aimant frotteur touche en dernier lieu, un pôle de nom contraire à celui avec lequel on frotte.

134. Champ terrestre. — Inclinaison et déclinaison. (Déf.).

(*a*). Une aiguille aimantée suspendue à un fil se fixe toujours dans une direction voisine de la ligne nord sud, donc le voisinage de la terre est un champ magnétique.

(*b*). *Inclinaison et déclinaison.—Le méridien astronomique* d'un point de la surface du globe est le plan qui passe par ce point et par les deux pôles terrestres, et la *méridienne* la trace de ce plan sur la surface du globe. Le *méridien magnétique* d'un lieu donné est lui aussi le plan vertical qui passe en ce lieu par les deux pôles d'une aiguille aimantée mobile et orientée. L'angle que font les méridiens magnétique et astronomique est la *déclinaison*, elle est orientale ou occidentale suivant que le pôle nord de l'aiguille se dirige à l'est ou à l'ouest du pôle astronomique.

L'aiguille aimantée, oscillant dans le plan du méridien magnétique, prend une certaine position d'équilibre, l'un de ses pôles étant incliné vers la terre. L'angle qu'elle fait alors avec le plan horizontal est *l'inclinaison*. Les points où l'inclinaison est nulle déterminent à la surface de la terre une ligne qu'on appelle *équateur magnétique*. Les lignes *isogones* sont les lignes de même *déclinaison ;* les *isoclines*, celles de même inclinaison. On appelle *pôles magnétiques* les points où *l'inclinaison* est de 90 degrés. Ils ne coïncident pas avec les pôles astronomiques.

135. Action mutuelle de la terre, des aimants, des solénoïdes et des courants. — Enoncé des lois d'Ampère.

(*a*). *Action mutuelle de la terre, des aimants, des solenoïdes et des courants.* Cette action mutuelle est de diriger l'aiguille aimantée dans la direction de l'aiguille d'inclinaison. L'action directrice des courants fut décou-

verte par Œrsted en 1819 ; il constata que si l'on fait passer un courant dans un conducteur ou fil disposé parallèlement à l'axe d'une aiguille, cette aiguille tend à se mettre en croix avec le conducteur, son pôle nord étant placé à gauche du courant.

Peu après Ampère formula une règle dite *règle d'Ampère*, donnant le sens de la déviation de l'aiguille : il appela *gauche du courant*, celle d'un observateur placé dans le fil qui réunit les deux pôles de manière que, la face étant tournée vers l'aiguille, le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête.

D'après cela, dans l'action de la terre sur les aimants, les choses se passent comme si la terre était parcourue par un courant allant de l'est à l'ouest.

Les actions mutuelles entre les courants engendrent des effets mécaniques, tel celui du *mouvement* qu'ils produisent à distance, soit sur des aimants mobiles, soit sur des conducteurs mobiles tel celui de la limaille de fer répandue sur un carton et traversée perpendiculairement par un courant, la limaille se dispose alors en lignes circulaires qui entourent le conducteur.

(*b*). *Enoncé des lois d'Ampère.* — Après la découverte d'Œrsted, Ampère s'aperçut que les courants agissaient et réagissaient les uns sur les autres, et il établit la série des lois suivantes :

Lois des courants parallèles.

1°. Deux courants parallèles de même sens s'attirent (fig. 102).

2°. Deux courants parallèles de sens contraires se repoussent (fig. 103).

Lois des courants angulaires.

1°. Deux courants rectilignes, dont les directions forment un angle, s'attirent (fig. 104) lorsqu'ils s'approchent ou s'éloignent (fig. 105) tous les deux du sommet.

2°. Ils se repoussent si, l'un marchant vers le sommet de l'angle, l'autre s'en éloigne.

Lois des courants sinueux.

L'attraction attractive ou répulsive d'un courant sinueux est la même que celle d'un courant rectiligne ayant mêmes extrémités.

(Fig. 102).

(Fig. 103).

(Fig. 104).

(Fig. 105).

Solénoïdes.—Si, par la seule application de la loi universelle d'égalité entre l'action et la réaction (*q-c*), on peut prévoir qu'un courant électrique fixe fasse dévier du méridien magnétique une aiguille aimantée mobile ; réciproquement, si le barreau aimanté est fixe et le courant mobile, celui-ci tendra se mettre en croix avec le barreau de telle façon que le pôle boréal de celui-ci reste à la droite du courant.

Les expériences d'Ampère peuvent toutes être répétées en faisant agir et réagir les uns sur les autres les courants et les aimants.

Cette parfaite équivalence entre les phénomènes électriques proprement dits et les phénomènes électromagnétiques conduisit Ampère à assimiler le magnétisme à l'électricité.

Il composa les solénoïdes (fig. 106) ou systèmes de

(Fig. 106).

courants circulaires égaux et parallèles formés d'un même fil de cuivre recouvert de soie et replié sur lui-même en hélice, puis ramené, suivant l'axe *B C*, soit dans l'intérieur soit à l'extérieur de manière que le courant rectiligne soit exactement égal à la somme des proportions des courants sinueux sur l'axe.

Il fit voir que ces appareils se comportent exactement comme des barreaux aimantés. Si on met un courant près d'un solénoïde et parallèlement à son axe *B C* (fig. 109), le solénoïde se mettra en croix, de même, affecté par les courants terrestres, il prend la direction de l'aiguille aimantée. Les pôles de même nom de deux solénoïdes se repoussent et ceux de nom contraire s'attirent.

Cette similitude entre les propriétés des solénoïdes et des aimants, a fait regarder ces derniers comme des solénoïdes magnétiques.

D'après cette dernière hypothèse, les *courants d'Ampère*, c'est-à-dire les courants dans les aimants comme dans les solénoïdes sont dirigés dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre au pôle sud ou boréal, et en sens contraire au pôle nord au austral.

136. Electro-aimants. (Déf.). — Magnétisme remanent. (Déf.).—Théorie d'Ampère sur le magnétisme.

(*a*). *Electro-aimants.*—Arago a démontré qu'un courant électrique pouvait aimanter certaines substances dites magnétiques, au premier rang desquelles est le fer. Ce fer, parcouru par un courant et plongé dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment et retombe aussitôt que le courant cesse.

Il rendit encore l'aimantation plus intense en enroulant le courant en spirale, et en plaçant une tige de fer ou d'acier à l'intérieur de cette spirale, il obtint ainsi un *électro-aimant.*

Les *électro-aimants* sont donc des barreaux de fer doux sur lesquels on a roulé un grand nombre de fois, en spirales superposées, un fil de cuivre bien isolé.

(*b*). *Magnétisme remanent.*—Arago remarqua aussi que le fer et l'acier s'aimantaient, mais que l'acier restait aimanté tandis que le fer doux perdait son aimantation dès que le courant cessait.

On expliquait ce phénomène en disant que l'acier avait une force coercitive, on l'explique aujourd'hui en regardant le fer doux comme étant plus perméable à l'action d'électrisation que l'acier. Aussi, cette perméabilité lui permet-elle de s'aimanter plus fortement et plus rapidement que l'acier, mais aussi l'aimantation disparaît plus rapidement. Après le passage du courant, la faible aimantation qui reste dans le fer constitue le *magnétisme remanent*, qui varie en intensité avec la pureté du fer : plus le fer est pur plus le magnétisme remanent est faible. Dans l'acier, au contraire, où la perméabilité est faible, le magnétisme remanent est plus fort et égale à peu près l'aimantation par le courant ; c'est ce qui fait qu'un barreau d'acier reste définitivement aimanté.

(*c*). *Théorie d'Ampère sur le magnétisme.*—Ampère attribua les phénomènes magnétiques à des courants circulaires électriques existant autour des molécules des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, les courants sont dirigés en tous sens et se détruisent ; mais l'aimantation a précisément pour effet de les faire circuler dans des sens parallèles et de les fixer sur des axes rectilignes et parallèles. L'aiguille ou le barreau aimanté ne serait donc qu'une *réunion* ou *faisceau de solénoïdes.*

§ 137. Conditions de l'induction par les courants et par les aimants. — Enoncé de la loi de Lentz. — Self-induction, extra-courant. (Déf.). — Bobine de Ruhmkorff, transformateurs.

(*a*). *Conditions de l'induction par les courants et par les aimants.*

Les courants d'induction ou *courants induits* furent découverts par Faraday en 1832. Il appela *courants d'induction*, ou *courants induits*, des courants qui sont produits à distance, dans des circuits métalliques fermés, par l'influence soit de courants électriques, soit d'aimants puissants. D'où deux sortes d'induction :

1°. L'induction par les courants ou *induction voltaïque*.

2°. L'induction par les aimants ou *induction magnétique*.

Lorsqu'un courant induit naît dans un circuit fermé, sous l'influence d'un autre courant, ce dernier est appelé *courant inducteur*.

L'induction voltaïque ou magnétique se produit : 1°. quand le courant inducteur commence ou finit ; 2°. quand son intensité croît ou décroît ; 3° quand sa distance au circuit induit diminue ou augmente.

Quand le courant inducteur commence, l'expérience montre que le courant induit est de sens inverse au courant inducteur; le courant inducteur finissant, le courant induit sera de même sens que lui.

Quand l'intensité du courant inducteur croît, l'expérience montre que le courant induit est de sens inverse au courant inducteur ; si, au contraire, le courant inducteur décroît, le courant induit est de même sens que lui.

Quand la distance du courant inducteur au circuit induit diminue, l'expérience montre que le courant induit est de sens inverse au courant inducteur ; si, au contraire, le courant inducteur augmente, le courant induit est de même sens que lui.

(*b*). *Enoncé de la loi de Lentz.*—Loi : Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la continuation de la cause qui lui donne naissance ; il agit comme une réaction.

(*c*). *Self-induction, extra-courant.* — Deux circuits ne sont pas nécessaires pour donner lieu aux phénomènes d'induction.

Lorsqu'on vient à ouvrir un circuit formé d'un long fil fin enroulé un grand nombre de fois sur lui-même, comme dans une bobine, et parcouru par un courant, on obtient en général une étincelle pouvant donner une commotion plus ou moins forte. Faraday, pour expliquer ce renforcement du courant, a admis que chacune des spires provoque sur les spires qui les entourent une action telle qu'un nouveau courant induit direct circule dans toute la longueur du conducteur et quand on ferme le circuit il y a un courant induit inverse.

Ces courants induits, produits par le courant principal, ont été appelés *extra-courants*, et le phénomène lui-même est appelé *self-induction*, c'est-à-dire induction d'un courant sur lui-même.

(*d*). *Bobine de Ruhmkorff, transformateurs.*—La bobine de Ruhmkorff est une application de l'induction voltaïque ; ce sont de véritables machines à courants induits et qui ont servi de type à une série d'appareils puissants appelés *transformateurs*.

Les organes essentiels d'une bobine sont deux circuits ou bobines de dimensions variables suivant la puissance de l'appareil, et un interrupteur.

Les deux bobines sont faites en fil de cuivre rouge parfaitement isolé, l'un en gros fil de cuivre rouge qui se trouve enroulé le premier, c'est le circuit inducteur séparé de la deuxième bobine par un manchon de caoutchouc isolant, sur lequel se trouve enroulé le fil fin constituant la deuxième bobine et qui est le fil induit.

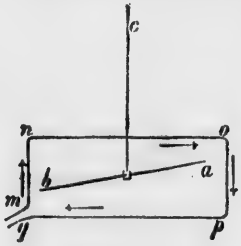
Quant aux transformateurs, ce sont des appareils capables de transformer les qualités de l'énergie électrique, en lui donnant des propriétés nouvelles, qu'elle ne possédait pas avant de traverser le transformateur. Ces appareils ne s'emploient guère qu'avec les dynamos à courants alternatifs, ils sont construits sur le même principe que les bobines.

136. Définition du galvanomètre et sa théorie.

Les galvanomètres sont des instruments qui servent à mesurer l'intensité d'un courant. Le courant électrique passe dans l'instrument, où il agit sur une aiguille aimantée qui est déviée plus ou moins. Le sens de la déviation dépend du sens du courant, et la grandeur de la déviation est une fonction de l'intensité.

L'action directrice de la terre, qui tend à maintenir l'aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est une force antagoniste qui diminue la déviation de l'aiguille. Il importe donc à la fois de multiplier l'action des courants et de diminuer celle de la terre.

Schweigger eut l'idée de replier plusieurs fois le fil conducteur du courant de manière à former un circuit multiple, rectangulaire et vertical, au centre duquel l'aiguille est suspendue par un fil de cocon. Supposons (fig. 107) que le courant marche dans la direction *n o p q* dans le sens des flèches, nous voyons, d'après la règle d'Ampère, (Lorsqu'on fait agir un courant sur une aiguille aimantée, l'aiguille tend à se mettre en croix avec le courant, de manière que son pôle austral soit constamment à la gauche de ce dernier), que chacune des parties *no*, *op*, *pq*, *qn* du fil enroulé concourt à faire dévier le pôle nord dans le même sens, et nous conclurons qu'en enroulant le fil conducteur autour d'un aimant, on augmente l'influence du courant sur cet aimant, et qu'en enroulant un grand nombre de fois le fil autour de l'aiguille, on rend l'action du courant d'une grande sensibilité. Cependant il faut limiter le nombre des tours du fil sur le cadre, attendu que la



(Fig. 107).

résistance qu'éprouve le courant augmente avec sa longueur. Au moment de l'observation, on place le fil dans le méridien magnétique, c'est-à-dire parallèle à l'axe de l'aiguille qui est suspendue dans le cadre.

Dans le galvanomètre, pour rendre l'action directrice de la terre très faible et pour donner toute l'intensité possible à celle du courant, on fait usage de deux *aiguilles astatiques*, c'est-à-dire deux aiguilles réunies entre elles par une tige rigide et ayant les pôles opposés en regard ; les actions magnétiques de la terre sur ces aiguilles se contrebalancent. L'une des aiguilles étant dans l'intérieur du cadre, l'autre à l'extérieur, l'action du courant s'exerce sur les deux à la fois et la déviation obtenue est plus prononcée qu'avec une seule aiguille.

139. Définir les principales unités électro-magnétiques, à courants pratiques, savoir : Volt, Ampère, Ohm, Coulomb, Farad et Watt.

Le système d'unité adopté par le congrès international d'électricité de Paris, en 1881, est connu sous le nom de système centimètre-gramme-seconde ou système *C. G. S.*

Les trois unités fondamentales mécaniques sont pour l'espace ou les longueurs, le centimètre ; pour la masse ou le poids, le gramme ; et pour le temps, la seconde.

Les unités servant aux mesures électriques dérivent de ces unités mécaniques.

En électricité dynamique ou voltaïque, le courant est considéré comme allant du point où le niveau électrique (potentiel) est le plus élevé, *pôle positif*, au point où le potentiel est le moins élevé, *pôle négatif*.

Dans un écoulement d'eau, à travers une conduite, il y a plusieurs choses à considérer : la différence de niveau, le débit de la conduite par unité de temps, et le frottement ou résistance de cette conduite, qui s'oppose à l'écoulement et tend à diminuer le débit. Il en est

de même d'un courant électrique circulant dans un conducteur : *La force électromotrice* représente la différence de niveau ; *l'intensité* du courant représente le débit de la conduite ; *la résistance* du conducteur représente le frottement du liquide contre les parois de la conduite.

Le débit ou intensité du courant sera d'autant plus grand que la force électromotrice sera plus élevée, et la résistance du conducteur plus faible. Ces relations entre les trois grandeurs électriques, *force électromotrice, résistance et intensité* s'expriment à l'aide d'une loi fort simple nommée *loi de Ohm* (129-b).

A chacune de ces trois grandeurs, intensité du courant (*I*) ; force électromotrice (*E*) ; et résistance du courant (*R*) ; correspond une unité pratique et invariable.

Volt. Le volt est *l'unité de force électromotrice* ou de *différence de potentiel.* C'est la force nécessaire pour maintenir un courant ayant pour intensité un *Ampère* dans un *ohm* légal. On peut se faire une idée de la valeur de cette unité, en se représentant que la force électromotrice d'un élément Daniel est voisine d'un volt.

Ampère.—L'Ampère est *l'unité d'intensité,* c'est l'électricité qui traverse un circuit de 1 ohm de résistance, avec une différence de potentiel de 1 volt à ses deux extrémités.

On traduit encore l'ampère par le dépôt d'un métal sur l'objet soumis à une cuve galvanoplastique, c'est l'intensité de courant nécessaire pour libérer 4 gr. 025 d'argent pendant une heure.

Ohm.—L'ohm est *l'unité de résistance,* il représente la résistance qu'oppose au passage du courant une colonne de mercure d'un millimètre carré de section sur 1m. 06 de long à 0°c.

Quarante mètres de fil de cuivre du commerce, ayant 1 mm de diamètre, comportent une résistance de 1 ohm.

Ces trois unités sont reliées entre elles par la loi de ohm, de la manière suivante :

$$I = \frac{E}{R} \text{ c'est-à-dire Ampère } = \frac{\text{volt}}{\text{ohm}}$$

Coulomb.—Le Coulomb est *l'unité de quantité.* C'est la quantité d'électricité fournie en une seconde par un courant ayant pour intensité un Ampère.

Farad.—Le farad est *l'unité de capacité,* qui est celle d'un conducteur qu'une unité de quantité ou Coulomb élèverait à l'unité de potentiel.

Dans la pratique, le farad est l'unité d'un conducteur qu'un Coulomb élèverait à un volt.

Cette unité étant trop grande, pour les mesures ordinaires, on se sert du *miers-farad* qui en est la millionième partie.

Watt.—Le Watt est *l'unité de puissance électrique,* c'est le produit d'un ampère par un volt.

Il faut 2 Watts ½ à 4 Watts ½, suivant les lampes électriques, pour obtenir un éclairage correspondant à une bougie.

L'unité de lumière est le Carcel qui vaut de 6 à 7 bougies.

Ampère-heure.—L'ampère-heure est la quantité d'électricité qui traverse un conducteur pendant une heure ou 3.600 secondes, quand l'intensité du courant est d'un Ampère.

L'ampère-heure égale donc 3.600 Coulombs.

Cheval électrique.—Pour transformer en kilogrammètres un nombre donné de Watts (produit de volt par Ampère) il suffit de diviser ce nombre par l'accélération

due à la pesanteur, qui est à Paris de 9.808, d'où la formule :

$$\text{Puissance en kilogrammètres} = \frac{\text{Volts} + \text{Ampère ou Watt}}{9.808}$$

$$\text{et par conséquent en chev.} = \frac{\text{Volt} + \text{Ampère ou Watt}}{9.808 + 75}$$

un cheval valant 75 kilogrammètres.

On trouve ainsi qu'un cheval électrique est représenté par 736 Watts environ, c'est-à-dire égal à un cheval vapeur (75 kgm).

Le *cheval heure électrique*, ou énergie fournie pendant une heure par une source électrique d'une puissance égale à 736 watts ou 75 kgm. égale 75 kgm. × 3.600 secondes = 270,000 kgm.

Youle.—Le Youle est *l'unité pratique de travail électrique.* C'est le produit d'un volt par un Coulomb.

Récapitulation.

Loi de ohm. — L'*intensité* (*I*) égale la force électromotrice (*E*) divisée par la résistance (*R*).

$$I = \frac{E}{R}$$

Volt = Unité de force électromotrice (*E*) = ohm × ampère.

$$\text{Ampère} = \text{Unité d'intensité } (I) = \frac{\text{volt}}{\text{ohm}}$$

$$\text{Ohm} = \text{Unité de résistance } (R) = \frac{\text{volt}}{\text{ampère}}$$

Coulomb = Unité de quantité.
Farad = Unité de capacité.
Watt = Unité de puissance = Volt × Ampère.
Youle = Unité pratique de travail = Volt × Coulomb.
Ampère-heure = 3.600 Coulombs.

Cheval électrique = environ 736 Watts = un cheval vapeur (75 kgm.)

Cheval heure électrique = 270.000 kgmètres.

140. Enoncer le principe des machines dynamo et magnéto-électriques, à courant continu et à courant alternatif.

On appelle machines électro-magnétiques des appareils qui transforment le travail mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire de l'induction magnéto-électrique : suivant que l'induction est produite par des aimants permanents ou par des électro-aimants, les machines sont appelées *magnéto-électriques* ou *dynamo-électriques*.

Les courants fournis peuvent être *alternatifs* ou *continus*. Dans les courants alternatifs ils se succèdent, alternativement directs et inverses, ce sont les machines à courants alternatifs ; tandis que les machines à courants continus sont des machines dont le courant ne change pas et dont l'intensité est constante.

Le principe de ces machines est le développement par induction d'un courant dans un fil conducteur en mouvement dans un champ magnétique.

Le principe des dynamos repose sur le principe suivant : Si, dans un champ magnétique, on déplace un conducteur dans un sens perpendiculaire aux lignes de force du champ, ce conducteur devient le siège d'une force électromotrice et est traversé par un courant.

Le dynamo consiste donc en un champ magnétique (inducteur) dans lequel se meut un conducteur (induit). Dans ces conditions, on conçoit facilement que l'énergie électrique produite dépendra de plusieurs facteurs, tel que l'intensité du champ magnétique, la vitesse de déplacement du conducteur, sa longueur, sa résistance.

La charge magnétique peut être constituée par un ai-

mant permanent ; dans ce cas la machine s'appelle *magnéto-électrique*. Ce système de machine est rarement employé à cause de leur encombrement et de leur rendement inférieur. On préfère les électro-aimants qui, à volume égal et à poids égal, fournissent un champ magnétique plus intense. L'induit se compose du noyau en fer doux et de l'enroulement du fil de l'armature.

L'inducteur, comme l'induit, se compose d'un noyau en fer doux massif et de l'enroulement qui se fait avec du fil de cuivre.

141. Principe de réversibilité des dynamos. — Moteurs électriques, leurs avantages.

Quand une dynamo reçoit de l'énergie mécanique pour faire tourner son armature, elle débite de l'énergie électrique ; mais si, au contraire, elle reçoit de l'énergie électrique, elle débite de l'énergie mécanique, fait que l'on appelle *réversibilité* des dynamos ; dans ce cas ce sont des moteurs électriques.

Les moteurs électriques offrent de grands avantages : de pouvoir distribuer l'énergie à un grand nombre de métiers ; de transporter l'énergie mécanique de chutes d'eau naturelles ; leur application à la traction, ex. : tramway.

142. Eclairage électrique, ses avantages. — Lampes à arc, à incandescence.—Soudure et métallurgie électriques.

L'éclairage électrique a les avantages suivants : de donner une grande fixité à la lumière dans les lampes incandescentes, d'avoir un éclat très vif, d'éviter la chaleur et les dangers d'incendie et de ne pas souiller l'air des appartements.

Il y a deux genres de lampes : 1°. les lampes à arc ou réflecteurs; 2°. les lampes à incandescence.

Lampe à arc.—Quand un courant très puissant circule

dans un conducteur, si l'on vient à rompre ce conducteur, le courant continue de s'établir entre les deux parties rompues, pourvu que la distance qui les sépare ne dépasse pas quelques millimètres, et alors il prend la forme d'un petit arc de lumière bleuâtre ; cet arc qui s'établit entre les deux pointes de charbon est ce que l'on appelle l'*arc voltaïque*. L'éclat de l'arc est dû moins à l'arc lui-même qu'à l'incandescence des pointes de charbon ; celles-ci, échauffées par la chaleur intense de l'arc, deviennent d'un blanc éblouissant, éclat qui est encore accru par le transport, à travers l'arc, de particules de charbon qui passent d'un pôle à l'autre. Ces particules sont naturellement portées à une très haute température et leur éclat est tel qu'il n'y a que la lumière du soleil qui puisse leur être comparée.

On sait aussi que le courant voltaïque, en traversant un conducteur d'une résistance considérable, échauffe ce conducteur jusqu'à le rendre incandescent, c'est cette propriété que l'on a utilisée dans les lampes à arc et à incandescence.

La longueur de l'arc voltaïque varie selon la puissance du courant, mais dans les lampes à arc les charbons se consument; il faut donc les rapprocher toujours pour que l'écart ne devienne pas trop considérable, autrement l'arc s'éteindrait. C'est pourquoi ces lampes se composent d'un mécanisme extrêmement sensible aux variations du courant, et dont le but est de maintenir la distance entre les deux charbons malgré leur usure. Généralement, le charbon négatif est fixe et c'est le positif comme brûlant deux fois plus vite qui s'en rapproche.

Les charbons dont on se sert sont généralement composés de coke en poudre fine, noir de fumée et mélasse, dont on fait une pâte avec un peu d'eau, le tout comprimé, séché et soumis à la cuisson dans un creuset à l'abri de l'air.

Lampe à incandescence.—Dans ce genre de lampe, la

lumière est produite par l'incandescence dans le vide d'un filament de charbon, obtenu par la carbonisation de différentes matières. Le filament est chauffé à blanc à cause de sa résistance, mais il ne brûle pas à cause de l'absence d'air dans l'ampoule. Ce filament est relié à deux fils qui percent l'ampoule de verre et forment les deux prises de courant ; ces fils doivent nécessairement être isolés l'un de l'autre sur tout leur parcours.

Une lampe de 16 bougies, ayant un courant de 110 volts, demande 0.6 d'ampère, ce qui donne environ 66 watts par lampe.

Soudure électrique.—Si, dans une lampe à arc, on remplace les charbons par des crayons métalliques, du fer par exemple, les points en contact étant chauffés à une haute température, il suffit de les presser pour les souder ; l'avantage de cette soudure c'est qu'elle peut se faire sans le concours d'un alliage quelconque.

Métallurgie électrique.—On se sert du co ant électrique soit pour l'extraction des métaux, opération que l'on appelle *électrolyse*, soit pour leur fabrication. Ex. : fourneau Moissan pour la fabrication du diamant.

143. Télégraphe de Morse. — Téléphone et microphone.

Une des applications les plus étonnantes de l'électricité est la transmission instantanée et à de grandes distances de la pensée humaine, soit par l'écriture, *télégraphes* ; soit par le langage, *téléphones*.

Les télégraphes sont donc des appareils servant à établir la correspondance entre deux stations éloignées, au moyen d'un fil conducteur.

Dans l'appareil de Morse, le signal est formé par la manœuvre du levier manipulateur dont la durée de contact qui résulte entre lui et son battoir de travail peut être brève ou longue. Ce sont ces contacts qui donnent les émissions de courant qui vont agir sur le récepteur

de la station d'arrivée et dont les durées sont enregistrées sur un rouleau de papier. Ce sont ces différents signes qui constituent le code de signaux de Morse.

Le téléphone, dont celui de Graham Bell est le plus simple, se compose d'un petit aimant autour duquel est enroulée une bobine de fil fin; à très peu de distance de l'un des pôles de l'aimant se trouve une plaque de fer, devant laquelle on parle. Les vibrations produites par la parole se transmettent à la plaque et occasionnent des variations dans le magnétisme de l'aimant ; ces variations déterminent dans la bobine la formation de courants induits, qui, envoyés dans un appareil semblable, reproduisent les vibrations premières et par suite le son.

La bobine communique d'un côté avec la terre et de l'autre avec la ligne.

Les téléphones ne donnant que des sons assez faibles, on doit se servir de transmetteurs microphoniques fonctionnant avec piles.

Le microphone consiste en un petit crayon de charbon terminé en pointe et qui s'applique sur une plaque élastique, le contact imparfait du charbon produit des courants ondulatoires plus énergiques que le courant téléphonique seul et qui permettent alors de beaucoup mieux entendre.

CHAPITRE ONZIEME.

MÉTÉOROLOGIE.

144. Vents. (Déf.), leur cause. —Vents réguliers. — Moussons et brises.

(*a*). *Vents, leur cause.*—Les *vents* sont des portions de l'atmosphère en mouvement, ou courants aériens dont la cause de production est toujours due aux change-

ments de densité qu'éprouve l'air par l'effet de la chaleur. L'air, échauffé au contact du sol, s'élève ; de là des courants ascendants ; puis, l'air se dilatant à mesure que la pression diminue, se refroidit et cesse de s'élever, les courants deviennent horizontaux et se dirigent des régions chaudes vers les régions froides.

(*b*). *Vents réguliers.* — *Les vents réguliers ou alizés* sont des vents qui soufflent toute l'année dans la même direction. Ils se font sentir jusqu'à 30 degrés de latitude de chaque côté de l'équateur. Ils soufflent du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère austral. Les couches d'air qui avoisinent le sol dans les régions intertropicales étant plus échauffées que dans les régions tempérées, cet air s'élève à mesure qu'il s'échauffe et se déverse dans la direction des pôles, tandis qu'il est remplacé par l'air relativement froid des contrées voisines.

(*c*). *Moussons et brises.* — *Les moussons* ou *vents périodiques* sont des vents qui soufflent six mois dans un sens, six mois dans le sens opposé. On les observe principalement dans les mers voisines des Indes. Ces vents sont dirigés vers les continents dans l'été, ce qui est dû à la haute température que ces continents atteignent pendant cette saison, et pendant l'hiver ils sont dirigés vers la mer, les continents se refroidissant plus que la mer pendant cette saison.

La *brise*, qui est aussi un vent périodique, souffle sur les côtes maritimes ; le jour, de la mer vers la terre, ce sont les *brises de mer* ou du *matin*, le soir, de la terre vers la mer, ce sont les brises de terre ou du soir ; c'est-à-dire de la région la plus froide vers la région la plus chaude. Le jour, la mer étant plus froide que la terre, et la nuit, la terre étant plus froide que la mer, ces brises ne se font sentir qu'à de faibles distances des côtes.

145. Formation des nuages.

Il s'élève constamment des divers points de la surface du globe des vapeurs d'autant plus abondantes que le sol est plus humide et plus échauffé. Ces vapeurs, en s'élevant, arrivent dans des régions atmosphériques de plus en plus froides, et finissent par se liquéfier. La région de l'air dans laquelle elles atteignent ainsi, en se refroidissant, la limite de saturation, perd sa température, par la formation et l'accumulation d'une infinité de gouttelettes d'eau. Quand cette accumulation se manifeste dans le voisinage du sol, on lui donne le nom de *brouillard ;* on l'appelle *nuage,* quand le phénomène n'apparaît qu'à une hauteur plus ou moins grande.

On divise les nuages en quatre espèces principales :

1°. *Cirrus,* petits nuages blanchâtres, assez semblables à de la laine cardée, leur apparition précède souvent un changement de temps.

2°. *Cumulus* sont des nuages arrondis, présentant l'aspect de montagnes entassées les unes sur les autres, plus fréquents en été qu'en hiver ; s'ils sont surmontés de cirrus, on doit s'attendre à de la pluie ou à des orages.

3°. *Strectus* sont des couches nuageuses horizontales se formant au coucher du soleil et disparaissant à son lever.

4° *Nimbus,* nuages de pluie sans forme caractéristique, d'une teinte d'un gris uniforme.

146. Pluie, rosée, serein, gelée blanche.

(*a*). *Pluie.*—La pluie est la chute, à l'état de gouttelettes, de l'eau provenant de la condensation, dans les hautes régions de l'atmosphère, des vapeurs qui s'élèvent du sol.

On mesure la quantité de pluie qui tombe dans un lieu au moyen du *pluviomètre,* appareil composé d'un vase

cylindrique fermé à sa partie supérieure par un couvercle ayant la forme d'un entonnoir dans lequel tombe l'eau de pluie. De la partie inférieure de ce vase part un tube de verre dans lequel l'eau s'élève à la même hauteur qu'à l'intérieur, hauteur qu'on lit sur une échelle graduée en millimètres, placée sur le côté du tube.

(*b*). *Rosée.*—On appelle *rosée* le dépôt aqueux qui s'opère à la surface du sol, pendant les nuits calmes et sereines. Ce phénomène est dû à ce que la terre échauffée, pendant le jour, par les rayons solaires, rayonne, pendant la nuit, une quantité de chaleur dont elle ne reçoit pas l'équivalent ; par conséquent étant plus froide que l'atmosphère qui la touche il y a dépôt de vapeur et cette vapeur, en se condensant, produit les gouttelettes d'eau qui recouvrent les objets exposés à l'air libre. Les rosées les plus abondantes ont lieu au printemps et à l'automne.

(*c*). *Serein.*—On a donné le nom de *serein* à une sorte de pluie extrêmement fine, qui tombe, au commencement de la nuit, après une journée chaude et humide, cette pluie légère est l'effet d'un refroidissement prompt de l'air.

(*d*). *Gelée blanche.*—La *gelée blanche* et le *givre* résultent, comme la rosée, des vapeurs contenues dans l'atmosphère, et se produisent quand l'abaissement de température est suffisant pour produire sa congélation, c'est-à-dire au-dessous de zéro. Il est à remarquer qu'alors la vapeur passe directement à l'état solide, sans passer par l'état liquide.

147. Neige, verglas, grêle.—Trombes.

(*a*). *Neige.*—La *neige* se forme par la congélation de la vapeur répandue dans les régions de l'atmosphère ou la température est 0° ou au-dessous de 0°. Il se produit de petits cristeaux de glace étoilés et diversement rami-

flés qui flottent dans l'atmosphère. Il tombe d'autant plus de neige qu'on est plus voisin des pôles ou plus élevé au-dessus du niveau des mers.

(*b*). *Verglas.* — Le *verglas* est cette mince couche de glace qui est engendrée par la chute d'une pluie fine sur un sol ou sur des corps dont la température est inférieure à zéro.

(*c*). *Grêle.*—On appelle ainsi un amas de globules de glace, ou *grêlons*, plus ou moins volumineux, qui tombent de l'atmosphère. La grêle est généralement le précurseur des orages, on l'observe principalement pendant le printemps et l'été.

(*d*). *Trombes.* — On appelle ainsi des amas de vapeurs ou colonne nuageuse communiquant avec la terre ou la mer, et ayant habituellement un mouvement giratoire rapide et un mouvement de translation.

Les *trombes de mer* ont lieu généralement sous l'influence d'une température élevée ; la pointe d'un nuage orageux agit sur la surface des eaux, qui se soulèvent, en formant un cône qui va joindre le cône descendant de ce nuage. Cette trombe est redoutable pour les marins. Les *trombes de terre* sont plus rares que les précédentes. Elles se manifestent par la descente d'un nuage orageux, qui se termine, à quelques mètres du sol, par une calotte de feu, et qui, en éclatant, brise et transporte les objets à proximité. On leur attribue une origine électrique.

148. Electricité habituelle de l'atmosphère et des nuages.—Eclair.—Bruit du tonnerre.—Choc en retour. —Paratonnerres.—Aurore boréale.

(*a*). *Electricité habituelle de l'atmosphère et des nuages.*— L'électricité habituelle de l'atmosphère est toujours positive, pourvu qu'à une certaine distance du lieu d'observation il ne tombe ni pluie, ni grêle, ni neige. L'élec-

tricité de l'atmosphère augmente à mesure que s'accroît l'humidité relative. Les nuages n'ont pas par eux-mêmes une tension propre par rapport au milieu ambiant. La loi suivant laquelle se manifeste l'électricité pendant les pluies s'énonce ainsi :

Loi.—Là où tombe la pluie, il existe une forte manifestation d'électricité positive, entourée d'une zone d'électricité négative, suivie elle-même d'une autre zone d'électricité positive.

(*b*). *Eclair.*—L'éclair est une vive étincelle électrique qui jaillit entre deux nuages ou deux groupes de nuages, ou, le plus souvent, entre un nuage et un point quelconque communiquant avec le sol.

(*c*). *Bruit du tonnerre.*—Le tonnerre est la détonation violente qui succède à l'éclair. L'éclair et la détonation sont toujours simultanés, mais l'intervalle que l'on observe entre ces deux phénomènes provient de ce que le son ne parcourt qu'environ 337 mètres par seconde. Le bruit du tonnerre résulte de l'ébranlement qu'excite, dans la nue et dans l'air, la décharge électrique.

(*d*). *Choc en retour.*—Le *choc en retour* est une commotion violente et même mortelle que ressentent parfois les hommes et les animaux à une assez grande distance du lieu où la foudre tombe. Ce phénomène est dû à l'action par influence que le nuage orageux exerce sur tous les corps placés dans sa sphère d'activité. Ces corps se trouvent, ainsi que le sol, chargés d'électricité contraire à celle du nuage, mais si ce dernier se décharge par la recomposition de son électricité avec celle du sol, immédiatement l'influence cesse, et les corps revenant brusquement de l'état électrique à l'état neutre, il en résulte la secousse qui caractérise le choc en retour.

(*e*). *Paratonnerres.* — Le paratonnerre a pour objet de présenter un écoulement facile à l'électricité du sol,

attirée par l'électricité contraire des nuages orageux. Il est dû à Franklin. Il se compose d'une tige de fer et d'un conducteur métallique, la tige est terminée par une tige en cuivre que surmonte une aiguille en platine. Le conducteur se rend dans un puits, et pour mieux établir la communication avec le sol, on le termine par deux ou trois ramifications. Une tige de paratonnerre qui surmonte un édifice préserve horizontalement un espace circulaire dont le rayon est égal au double de sa tige.

(*f*). *Aurores boréales.* — Les *aurores boréales* ou mieux les *aurores polaires*, sont des phénomènes lumineux qui apparaissent fréquemment dans le voisinage des pôles terrestres. Celles qui se produisent au pôle nord sont les *aurores boréales*, et au pôle sud les *aurores australes*. Les aurores boréales seraient dues à des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires, entre l'électricité positive de l'atmosphère et l'électricité négative du globe terrestre.

149. Arc-en-ciel, son principe, et conditions pour qu'il se produise.

L'arc-en-ciel est un météore lumineux qui apparaît dans les nues opposées au soleil quand elles se résolvent en pluie. Il est formé de sept couleurs du spectre solaire. Il est dû à la décomposition de la lumière blanche du soleil au moment où elle pénètre dans les gouttes de pluie et se réfléte sur leur face interne.

L'apparition de l'arc-en-ciel et son étendue dépendent de la position de l'observateur et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Il sera visible à l'observateur si ce dernier est placé entre le météore et le soleil ; et le sommet de la courbe que formera l'arc-en-ciel sera d'autant plus élevé que le soleil sera plus près de l'horizon.

BIBLIOTHÈQUE SAINT-SULPICE

150. Principales causes qui modifient la température de l'air dans un lieu donné.—Courants marins.

(*a*). Les principales causes qui modifient la température de l'air dans un lieu donné sont :

1°. La *latitude* dont l'influence résulte du plus ou moins d'obliquité des rayons solaires.

2°. *L'altitude*, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau des mers imprime à la température de l'atmosphère un décroissement beaucoup plus rapide que celui qui résulte de la latitude. On évalue en moyenne l'abaissement de température à 1 degré par 168 mètres pour la zone torride et tempérée.

3°. *La direction des vents* qui pour un même lieu a une grande influence sur la température de l'air.

4°. *La proximité des mers* qui tend à élever la température de l'air et à la rendre plus uniforme.

(*b*). *Courants marins.*—Le plus important des courants marins est le *Gulf-stream* dont le parcours total, aller et retour, est de 28,000 kilomètres, et la largeur en certaines parties de plusieurs centaines de lieues. Il traverse l'Atlantique de l'est à l'ouest, suit les côtes de l'Amérique du Sud jusqu'au golfe du Mexique pour de là se diriger vers le nord.

Il existe aussi dans l'Océan Pacifique un courant marin se dirigeant du golfe du Bengale vers le détroit de Behring. Tous ces courants ont pour cause la différence de température et, par suite, de densité des eaux chaudes de la mer sous les tropiques et des eaux froides des mers glaciales.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE I.

PAGE.

Objet de la Physique.—Matière.—Corps.—Atômes.—Molécules.. 1
Lois des Corps.—Causes des phénomènes physiques.—Théorie dynamique.. 2

CHAPITRE II.

Propriétés générales des corps.. 4

CHAPITRE III.

MÉCANIQUE.

Mouvement. — Mouvement rectiligne uniforme, Vitesse et espace parcouru.. 6
Mouvement varié.—Mouvement uniformément varié. Vitesse à un instant donné.. 8
Vitesse moyenne.—Mouvement uniformément retardé 8
Composition de deux mouvements angulaires uniformes, simultanés sans vitesse initiale.. .. 10
Mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe, vitesse angulaire.. 12
Inertie.—Force.—Action et réaction.—Indépendance des forces.. 14
Rapport de deux forces appliquées successivement à un même corps.. 14
Rapport de deux forces appliquées à des corps différents.. 14
Masse des corps.. 14
Composition des forces.—Composition de deux forces concourantes appliquées à un même point.—Composition d'un nombre quelconque de forces concourantes appliquées à un même point.. .. 18

PAGE.
Composition de deux forces parallèles.. 20
Composition d'un nombre quelconque de forces parallèles.—Centre des forces parallèles.. 20
Centre de gravité.—Principes généraux pour sa détermination.. 25
Détermination du centre de gravité du triangle et du tétraèdre.. 25
Force centripète et force centrifuge.. 27
Travail des forces.. 29
Valeur du travail d'une force appliquée à un point dont le déplacement est rectiligne.. 29
Unité de travail.. 29
Force vive.—Sa relation avec le travail.. 31
Machines simples.—Levier poulie fixe.—Poulie mobile.. 33
Moufles.—Treuil.—Plan incliné.. 33
Relation entre la puissance et la résistance.. 33
Ce que l'on gagne en force, on le perd en vitesse.. .. 44
Influence des résistances dites passives.. 44
Le travail moteur est toujours plus grand que le travail résistant utile.. 44

CHAPITRE IV.

PESANTEUR.

Attraction universelle.—Sa loi.. 47
Pesanteur.—Verticale.—Fil à plomb.. 48
Densité.—Poids absolu; relatif; spécifique 48
Equilibre des corps.—Divers états d'équilibre 51
Balance.—Conditions de précision et de sensibilité.. 52
Méthode des doubles pesées.. 52
Lois de la chute des corps.—Machine d'Atwood.. .. 57
Formules fondamentales relatives à la chute des corps.. 57
Causes qui modifient l'intensité de la pesanteur.. .. 61
Pendule simple; pendule composé.. 62
Lois des oscillations du pendule 62
Longueur du pendule composé; usages du pendule.. 62

CHAPITRE V.

LIQUIDES.

Caractères généraux des liquides.. 66
Principes d'égalité de pression.. 66

PAGE.

Pressions développées dans les liquides par la pesanteur 67
Pression de haut en bas; lois.. 67
Pression de bas en haut ou poussée.. 67
La pression sur le fond des vases est indépendante de leurs formes.. 68
Pression latérale.—Centre de pression.. 68
Centre hydrostatique.. 69
Conditions d'équilibre.—1. D'un liquide dans un seul vase.. 70
2. D'un seul liquide dans plusieurs vases communiquants.. 70
3. De plusieurs liquides superposés dans un sev' vase 70
4. De plusieurs liquides hétérogènes dans deux vases communiquants.. 70
Presse hydraulique.. 71
Niveau d'eau et niveau à bulle d'air 72
Pressions supportées par un corps plongé dans un liquide.. 73
Principe d'Archimède.. 73
Equilibre des corps immergés et des corps flottants 74
Détermination des poids spécifiques des solides et des liquides.. 75
Méthode de la balance hydrostatique.—Méthode du flacon.. 75
Aréomètre de Beaumé.. 78
Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.. 80
Phénomènes capillaires.. 81

CHAPITRE VI.

GAZ.

Caractères physiques des gaz.—Expérience démontrant leur force expansive.. 81
Poids des gaz.—Comment on le constate.. 83
Pression et hauteur de l'atmosphère.. 83
Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes ou en livres.. 83
Expérience de Toricelli 83
Baromètres.. 84
Variations de la hauteur barométrique.—Causes .. 85
Loi de Mariotte.. 86
Manomètres.—Manomètre à air libre; à air comprimé; métallique.. 87
Absorption des gaz par les liquides.—Lois.. 88

PAGE.
Principe d'Archimède applicable aux gaz.—Baroscope 91
Ballons.—Construction, remplissage et ascension .. 93
Machine pneumatique.. 95
Siphon 96
Pompe aspirante et foulante.. 97

CHAPITRE VII.

ACOUSTIQUE.

Son et bruit.. 99
Cause du son.—Le son ne se propage pas dans le vide 99
Mode de propagation du son dans l'air.. 100
Causes qui font varier l'intensité du son.. 101
Vitesse du son dans l'air.. 101
Echo et résonnance.. 103
Méthode pour mesurer le nombre de vibrations.. .. 104
Méthode acoustique.—Méthode graphique 104
Qualité du son musical 106
Hauteur, intensité, timbre, causes.. 106
Accords et intervalles.—Harmoniques.—Echelle musicale; gamme et rapports des différents degrés 106
Vibrations transversales des cordes.—Nœuds et sons harmoniques des cordes.—Leur existence et leur relation mutuelle.. 107
Tuyaux sonores. — Tuyaux à bouche. — Tuyaux à anche.. 108
Nœuds et ventres de vibrations dans les tuyaux sonores 109
Expérience démonstrative; indication de leur cause 109

CHAPITRE VIII.

CHALEUR.

Chaleur, hypothèse sur sa nature: théorie dynamique 110
Thermomètres.—Thermomètre à mercure.. 110
Division du tube; remplissage; graduation.. 110
Limite de l'emploi du thermomètre à mercure.—Thermomètre à alcool 110
Dilatation linéaire et dilatation cubique des solides, coefficient de dilatation.. 114
Principales formules relatives aux dilatations des solides.. 114
Pendule compensateur à gril.—Mode d'action.. .. 118

PAGE.

Dilatation apparente et dilatation absolue des liquides 119
Correction de la hauteur barométrique relative à la température.. 120
Maximum de la densité de l'eau.. 122
Dilatation des gaz.—Loi approchée pour tous les gaz 122
Enoncé et valeur du coefficient de dilatation.. 122
Poids spécifique des gaz par rapport à l'air.. 123
Comment on les détermine et corrections à faire.. 123
Fusion.—Lois.—Chaleur latente.—Dissolution 125
Solidification.—Lois.. 130
Vaporisation et vapeurs.—Force élastique des vapeurs 130
Différence entre vapeurs saturantes et vapeurs non saturantes.. 131
Principe de la méthode de Regnault pour déterminer la tension des vapeurs au-dessus et au-dessous de 100° C.—Comment il l'a appliqué.. 132
Evaporation.—Définition et causes qui l'accélèrent 133
Ebullition.—Lois.—Chaleur de vaporisation 134
Influence de la pression sur la température d'ébullition.. 134
Mesures de la hauteur des montagnes par la température d'ébullition 134
Production des vapeurs en vase clos.—Marmite de Papin. 136
Etat sphéroïdal des liquides.. 136
Hygrométrie.—Etat hygrométrique 137
Hygromètre à condensation.—Psychromètre.. 137
Chaleurs spécifiques.—Calories.. 140
Valeur ou mesure de la chaleur sensible, absorbée ou perdue par les corps.. 140
Méthode des mélanges.—Mesures de la chaleur de fusion et de vaporisation.. 140
Conductibilité de la chaleur par les solides, par les liquides et par les gaz.. 147
Rayonnement ou radiation de la chaleur.—Lois .. 147
Lois de la réflexion régulière de la chaleur.. 148
Réflexion irrégulière de la chaleur ou diffusion.. 148
Pouvoirs des corps par rapport à la chaleur 149
Pouvoir réflecteur, absorbant, émissif, diathermane 149
Chauffage par les cheminées, par les poêles.. 151
Par la vapeur, par l'air chaud, par circulation d'eau chaude, Tirage.. 151

PAGE.
Principes des machines à vapeur.—Générateur de vapeur 152
Distribution de vapeur.—Détente.—Condenseur . . 152
Equivalent mécanique de la chaleur. 154

CHAPITRE IX.

LUMIÈRE.

Lumière.—Théorie des ondulations. 154
Corps lumineux; éclairés; diaphanes 154
Translucides; opaques. 154
Propagation de la lumière dans un milieu homogène 155
Rayon lumineux.—Ombre, pénombre, reflet. 155
Photomètres.—Principe 156
Lois de la réflexion de la lumière.—Réflexion irrégulière 158
Miroirs plans.—Détermination graphique des images dans les miroirs plans. 159
Distinction entre les images réelles et les images virtuelles 159
Miroirs sphériques.—Détermination graphique du foyer principal, du foyer conjugué, du foyer virtuel dans les miroirs concaves 160
Construction graphique des images réelles et des images virtuelles dans les miroirs concaves.—Détermination graphique des foyers et des images dans les miroirs convexes. 161
Réfraction de la lumière.—Lois de la réfraction simple. 167
Indice de réfraction.—Angle limite et réflexion totale. 169
Théorie du mirage. 169
Prismes.—Marche des rayons dans les prismes.—Angle de déviation. 171
Lentilles.—Différentes espèces de lentilles.—Assimilation des lentilles aux prismes pour la marche des rayons. 173
Détermination graphique du foyer principal des foyers conjugués et des foyers virtuels dans les lentilles biconvexes 175
Centre optique et axes secondaires.—Construction graphique des images réelles et des images virtuelles dans les lentilles biconvexes. 175
Détermination graphique des foyers et des images dans les lentilles biconvexes. 175

PAGE.
Décomposition de la lumière blanche, spectre solaire 185
Raies du spectre solaire.—Analyse spectrale 185
Aberration de réfrangibilité.—Achromatisme 187
Microscope simple.—Microscope composé.. 187
Lunette astronomique.—Lunette terrestre. — Télescope Kenton modifié par Foucault 189
Chambre obscure.—Lanterne magique 191
Principe de la photographie 192
Marche des rayons lumineux dans l'œil.. 193
Cause du relief apparent des corps.—Stéréoscope.. 194
Double réfraction.. 194
Polarisation de la lumière.—Plan de polarisation .. 195
Cas dans lesquels la lumière réfléchie est complètement ou parallèlement polarisée.. 195

CHAPITRE X.

ÉLECTRICITÉ. — MAGNÉTISME.

Electricité.—Electricité par frottement.—Bons et mauvais conducteurs 197
Lois de Coulomb sur les attractions et les répulsions magnétiques 199
Masses électriques.—Unités de masse.. 199
Distribution de l'électricité à l'intérieur et à l'extérieur d'un conducteur.. 202
Electrisation par influence.—Electroscope à feuille d'or 203
Définition du potentiel par l'électromètre ou par le travail électrique.. 205
Capacité d'un conducteur.—Unité de capacité.—Condensateur.—Théorie 207
Machines électriques 210
Machine à induction ou à frottement.—Théorie .. 210
Théorie chimique de la pile à un seul liquide.. .. 211
Théorie chimique à deux liquides, ou à liquide dépolarisant.. 211
Qu'entend-on par courant électrique?.. 213
Enoncé des lois de Ohm et de Joule.. 213
Phénomènes généraux de l'électrolyse des composés binaires et ternaires.. 215
Enoncé de la loi de Faraday.. 215
Galvanoplastie, dorure, argenture.. 219
Electrotypie.—Electrochimie.. 220
Courants thermoélectriques. — Production. — Caractères 220

PAGE.
Aimants naturels et artificiels.. 222
Poles.—Ligne neutre.. 222
Enoncé des lois de Coulomb sur les actions magnétiques 222
Champ magnétique.—Ligne de force.. 222
Procédé d'aimantation 224
Champ terrestre.—Inclinaison et déclinaison 225
Action mutuelle de la terre, des aimants.. 225
Des solénoïdes et des courants.—Lois d'Ampère.. .. 225
Electro aimants.—Magnétisme rémanent 228
Théorie d'Ampère sur le magnétisme.. 228
Conditions de l'induction par les courants et par les aimants.. 229
Lois de Lentz.—Self induction.—Extra courant .. 229
Bobine de Rhumkorff.—Transformateurs 229
Définition du galvanomètre.—Sa théorie 232
Définition des principales unités électromagnétiques à courant pratique.. 233
Volt.—Ampère.—Coulomb.—Farad.—Watt.. 233
Principe des machines dynamo et magnéto électriques à courant continu et à courant alternatif 237
Principe de reversibilité des dynamos.—Moteurs électriques; leurs avantages.. 237
Eclairage électrique.—Ses avantages.. 238
Lampes à arc et à incandescence.. 238
Soudure et métallurgie électriques.. 238
Télégraphe.—Téléphone.—Microphone.. 240

CHAPITRE XI.

MÉTÉOROLOGIE.

Vents; leur cause.—Vents réguliers, Moussons; brises 241
Formation des nuages.—Pluie.—Rosée.—Serein.—Gelée blanche.. 243
Neige.—Verglas.—Grêle.—Trombes 244
Electricité de l'atmosphère et des nuages 245
Eclair, tonnerre, choc en retour, paratonnerres, aurore boréale 245
Arc-en-ciel.—Principe.—Conditions de formation .. 247
Principales causes qui modifient la température .. 248
Courants marins 248

PAGE.
. .. 222
. .. 222
agné-
. .. 222
. .. 222
. .. 224
. .. 225
. .. 225
. .. 225
. .. 228
. .. 228
r les
. .. 229
t .. 229
. .. 229
. .. 232
ques
. .. 233
. .. 233
élec-
natif 237
élec-
. .. 237
. .. 238
. .. 238
. .. 238
. .. 240

rises 241
ein.—
. .. 243
. .. 244
. .. 245
, au-
. .. 245
n .. 247
re .. 248
. .. 248

CADIEUX & DEROME, Editeurs,

1603, rue Notre-Dame. MONTREAL.

GUERIN (Mgr). Nouveau dictionnaire universel illustré avec supplément pour le Canada, 1 fort vol. in-12... $1.00
FERLAND (L'abbé). Histoire du Canada, 2 vol. in-8.. 2.50
LEBLOND (A.). Histoire populaire du Canada, in-12, cart. 25c
DRIOUX (L'abbé). Histoire ecclésiastique, in-8, cart. 30c
" " " romaine, " " 35c
" " " sainte, " " 25c
" " " ancienne, " " 35c
" " Précis de mythologie grecque, " " 30c
" " Histoire moderne, " " 35c
" " " de France, " " 30c
" " " d'Angleterre, " " 35c
GAZEAU (R. P.). Histoire romaine, " 45c
" " " moderne, " 90c
" " " ancienne, " 38c
" " " de France, 2-18 ..... $1.20
" " " du moyen âge, " 90c
COURVAL. Histoire sainte, " 38c
" " ancienne, " 55c
" " romaine, " 60c
" " du moyen âge, " 90c
" " moderne, 2-18 ..... $1.50
" " de France, 1 vol., " 75c
" " contemporaine, " 75c
" " de France, 2-18 ..... $1.50
VERNIOLLES. Cours élémentaire de littérature..... 85c
" " de rhétorique et d'éloquence... 85c
CHANTREL. Cours abrégé de littérature..... 90c
MESTRE. Principes de littérature..... 90c
" Préceptes de rhétorique..... 90c
DRIOUX. Précis élémentaire de littérature française .. 45c
" Histoire abrégée des littératures étrangères 50c
F. J. Précis d'histoire de littérature..... 70c
" Cours abrégé de littérature..... 40c